

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2009

Simona Endlerová

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA TEXTILNÍ



Studijní program: B3107 Textil
Studijní obor: Textilní materiály a zkušebnictví

VLASTNOSTI UHLÍKOVÝCH VLÁKEN

CARBON FIBERS PROPERTIES

Simona Endlerová
KTM - 535

Rozsah práce:

Počet stran:42

Počet obrázků:10

Počet tabulek:10

Počet příloh:8

Originál zadání práce

Prohlášení

Prohlašuji, že předložená diplomová (bakalářská) práce je původní a zpracoval/a jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušil/a autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním diplomové (bakalářské) práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byl/a jsem seznámen/a s tím, že na mou diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové (bakalářské) práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové (bakalářské) práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové (bakalářské) práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci, dne 25.května 2009

.....

Podpis

Poděkování

Děkuji vedoucí bakalářské práce paní Ing. Blance Tomkové, Ph.D. za odbornou pomoc, cenné rady a připomínky při realizaci této bakalářské práce. Dále děkuji panu Ing. Vladimíru Kovačiči, paní Ing. Jindře Porkertové a laborantkám Katedry textilních materiálů paní Danuši Steklé a Vlastě Kopecké za pomoc a ochotu při měření.

Chtěla bych také poděkovat své rodině a blízkým za podporu v průběhu celého studia.

Anotace

Cílem této práce bylo vytvořit přehled současných výrobců uhlíkových vláken a zjistit, jaké typy vláken na trhu převažují a jaké vlastnosti u nich výrobci uvádějí. U vybraných typů vláken největšího světového výrobce firmy Toray bylo experimentálně ověřeno, jestli uvedené údaje pro daná vlákna odpovídají. Pro měření vybraných vlastností byly použity standardní metody používané v laboratořích Katedry textilních materiálů.

Annotation

The task of the thesis was analysis of current state in carbon fibers production, summary of the fibre types, and view of the properties announced by the producers. Selected fibers produced by world leader the Toray company were experimentally measured to verify the parameters announced in Technical data sheets. The properties were measured by standard methods utilized in the laboratories of Department of Textile Materials.

Klíčová slova:

Uhlíková vlákna, struktura, vlastnosti, výroba uhlíkových vláken, pevnostní charakteristiky, měření vlastností.

Key words

Carbon fibers, structure, properties, manufacturing of carbon fibers, strength properties, measurement of properties.

Použité symboly

C	uhlík
PAN	polyakrylonitril
N ₂	dusík
Ar	argon
IM	střední modul
HM	vysoký modul
UHM	velmi vysoký modul

Použité veličiny

σ	[GPa]	pevnost v tahu
E	[GPa]	modul pružnosti v tahu
ε	[%]	poměrné prodloužení (tažnost)
ρ	[g/cm ³]	měrná hmotnost
d	[μ m]	průměr vlákna
T	[tex]	jemnost
F	[N]	síla
Δl	[mm]	protažení do přetrhu
F _s	[N/tex]	měrná síla

OBSAH

ÚVOD	9
1 TEORETICKÁ ČÁST	10
1.1 UHLÍK A JEHO MODIFIKACE	10
1.1.1 Alotropie uhlíku	10
1.2 UHLÍKOVÁ VLÁKNA	13
1.2.1 Výroba uhlíkových vláken	13
1.2.1.1 Uhlíková vlákna z PAN	15
1.2.1.2 Uhlíková vlákna ze smol	16
1.2.2 Struktura uhlíkových vláken	17
1.2.2.1 Mikrostruktura uhlíkových vláken z PAN	17
1.2.2.2 Mikrostruktura uhlíkových vláken ze smol	18
1.2.3 Vlastnosti uhlíkových vláken	18
1.2.4 Úprava povrchu uhlíkových vláken	20
1.2.5 Typy produktů z vláken	20
1.2.6 Aplikace uhlíkových vláken	21
1.3 VÝROBCI UHLÍKOVÝCH VLÁKEN	23
1.3.1 Historie	23
1.3.2 Všeobecné informace	23
1.3.3 Toray Industries, Inc.	24
1.3.4 Toho Tenax Co., Ltd.	26
1.3.5 Mitsubishi Group	26
1.3.5.1 Mitsubishi Rayon Co., Ltd.	26
1.3.5.2 Mitsubishi Chemical Corporation	27
1.3.6 Ostatní výrobci	27
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	29
2.1 CHARAKTERISTIKA VYBRANÝCH TYPŮ C-VLÁKEN	29
2.2 TESTOVACÍ METODY	30
2.2.1 Stanovení průměru vláken	30
2.2.2 Stanovení měrné hmotnosti	31
2.2.3 Pevnost a tažnost jednotlivých vláken	31
2.2.4 Nepřímá měření	32

2.2.5 Mikrofotografie uhlíkových vláken	33
2.3 VÝSLEDKY A DISKUZE	35
2.3.1 Průměr vláken	35
2.3.2 Měrná hmotnost vláken	35
2.3.3 Pevnost a tažnost vláken	36
2.3.4 Vypočítané parametry vláken	38
2.3.5 Vzhled povrchu uhlíkových vláken	39
ZÁVĚR	40
LITERARURA	41
SEZNAM OBRÁZKŮ	42
SEZNAM TABULEK	42
SEZNAM PŘÍLOH	

ÚVOD

Uhlíková vlákna jako technický materiál jsou známa zhruba 50 let. Postupně byly vyvíjeny nové typy vláken se speciálními vlastnostmi. Původní materiál sloužící pouze pro vysokoteplotní izolace získával stále vyšší pevnost, modul pružnosti, elektrickou a tepelnou vodivost, respektive adsorpční vlastnosti [9]. Mezi nejvýznamnější výrobce patří firmy Toray, Teijin a Mitsubishi. Rostoucí zájem o tyto materiály a rozšíření aplikačních možností vedlo k výraznému růstu počtu firem, které se výrobou uhlíkových vláken zabývají, kvalita jejich produktů se ovšem významně liší. Při výběru dodavatele je proto třeba sledovat nejen uvedené základní parametry a cenu nabízených vláken, ale také věrohodnost údajů, které výrobci u daných materiálů uvádějí. To nelze ověřit jinak, než experimentálním měřením vlastností vybraných vláken.

V prvním přiblížení můžeme dodávaná uhlíková vlákna rozdělit podle jejich pevnostních charakteristik [1]

- *uhlíková vlákna nižších parametrů* - pevnost v tahu < 1000 MPa, modul pružnosti v tahu < 100 GPa.
- *uhlíková vlákna s vysokými mechanickými parametry* (high performance carbon fibers) - pevnost v tahu 3,5 - 7 GPa, modul pružnosti 230 - 930 GPa. Podle konkrétních mechanických vlastností je tato skupina dále členěna na vysocepevná vlákna (HT), vysokomodulová vlákna (HM), středně modulová vlákna (IM) a vlákna se supervysokým modulem (UHM).

Druhým krokem je vybrat vhodný typ vláken s ohledem na budoucí aplikace a ověřit parametry uváděné pro daný typ vláken. Třetím krokem je pak zohlednění poměru cena/výkon, pro řadu aplikací jsou dostačující uhlíková vlákna průměrných vlastností.

Cílem této práce bylo jednak vytvořit přehled současných výrobců uhlíkových vláken, zjistit, jaké typy vláken na trhu převažují a jaké vlastnosti u nich výrobci uvádějí, jednak u vybraných typů vláken experimentálně ověřit, jestli uvedené údaje pro daná vlákna odpovídají. Pro měření vybraných vlastností byly použity standardní metody používané v laboratořích Katedry textilních materiálů [20].

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 UHLÍK A JEHO MODIFIKACE

Uhlík je nepostradatelný prvek, který je vázán v celé řadě sloučenin. Je základním prvkem biosféry, je obsažen v rostlinách a živých organismech. Bohaté na uhlík jsou látky fosilní - uhlí, ropa, zemní plyn. Vyskytuje se v řadě výrobků, ať už jde o plastické hmoty, nátěrové hmoty, léčiva a mnoho dalších, které jsou součástí našeho každodenního života. A také je základním stavebním prvkem *uhlíkových vláken*.

Uhlík (C) je šestým prvkem a členem 14. skupiny periodické tabulky. Má relativní atomovou hmotnost 12 g.mol^{-1} . V přírodě se vyskytuje ve formě dvou stabilních izotopů: C^{12} a C^{13} . C^{12} tvoří okolo 99 % výskytu, zatímco izotop C^{13} zbývající 1 %. Interakcí neutronů s dusíkem v horní zemské atmosféře vzniká radioaktivní izotop C^{14} , který má velmi dlouhý poločas rozpadu (5730 let). Tento jev je využíván ke stanovení stáří nálezů organického původu [1].

1.1.1 Alotropie uhlíku

Uhlíkové atomy jsou schopné vytvářet různé molekulové konfigurace, tzv. alotropie. Mezi nejznámější alotropie uhlíku patří *tuha*, *diamant* a *amorfní uhlík*. Mezi méně známé, v přírodě se vzácně vyskytující, patří *fullereny*, které jsou v nynější době obvykle syntetizované a používány ve výzkumu. Dalšími alotropiemi jsou např. *skelný uhlík* a *lonsdaleit* [4].

Uspořádání uhlíkových atomů ve struktuře uhlíkových materiálů výrazně ovlivňuje jejich výsledné vlastnosti. Na vybraných vlastnostech různých uhlíkových materiálů ukázaných v tabulce Tab. 1 je ukázána jejich variabilita, způsobená právě rozdílnou vnitřní strukturou těchto materiálů.

Tab. 1 Typické vlastnosti vybraných typů uhlíkových materiálů [4]

Materiál	Vlastnost	Materiál	Vlastnost
Syntetický diamant	nejtvrdší známý materiál	Tuha	jedním z nejměkčích materiálů
Diamant	brusný materiál	Tuha	velmi dobré mazadlo
Diamant	vynikající elektrický izolátor	Tuha	vodič elektřiny
Diamant	nejznámější tepelný vodič	Některé varianty tuhy	užívané pro tepelnou izolaci
Diamant	vysoce transparentní	Tuha	matná
Diamant	krystaluje v krychlové soustavě	Tuha	krystaluje v šestiúhelníkovém systému
Amorfni uhlík	úplně izotropní	Uhlíkové nanotrubičky	vysoce anizotropní monokrystaly

Diamant

Struktura diamantu se skládá z regulérní trojrozměrné sítě sp^3 σ vazeb poskytující velmi pevnou, stabilní čtyřbokou strukturu. V důsledku toho je diamant nejtvrdší známý materiál. Vazebné elektrony uvnitř diamantové mřížky jsou upevněné mezi atomy tak, že elektrická měrná vodivost je velmi nízká, inklinující k izolaci. Diamant, kvůli jeho vyšší hustotě (3.513 g.cm^{-3} ve srovnání s 2.267 g.cm^{-3} pro tuhu), je velice stabilní alotropie ve vysokých tlacích ($> 600 \text{ GPa}$ při 20°C) [1].

Diamanty se používají k výrobě těch nejdražších šperků. Pro svou tvrdost a výbornou tepelnou vodivost (nikdy se nepřehřejí) se uplatňují v nejrůznějších rezných a vrtných nástrojích. Pro vysokou cenu bývají vyráběny synteticky. Vyskytují se v různých barevných modifikacích od takřka průhledné až po černou. Jelikož ke vzniku diamantu je zapotřebí obrovských tlaků a vysokých teplot, jsou nalézány především tam, kde žhavé magma z velkých hloubek vystoupilo na povrch a ztuhlo [5].

Grafit (tuha)

Ve struktuře grafitu jsou atomy vázány do dvojrozměrných šestiúhelníkových sítí kombinací sp^2 σ a π vazeb. Jednotlivé vrstvy spolu drží pouze pomocí slabých van der Waalsových sil. To dává tuze její měkkost a třecí vlastnost, čehož se využívá při výrobě tužek. Grafit je např. složkou sazí, které vznikají spalováním fosilních paliv. Je přítomen v částicích natolik nepatrných rozměrů, že saze mají spíše vlastnosti

amorfního uhlíku. Z grafitu se vyrábějí elektrody, kartáčky elektromotorů, uplatňuje se v metalurgickém průmyslu a slouží také jako součást maziv (grafitová vazelína, kolomaz) [1,5].

Amorfní uhlík

Amorfní uhlík je směs atomů uhlíku v neregulárním, nekystalickém stavu. Je to v podstatě tuha neodržená v krystalové makrostruktuře představována jako prach. Amorfní uhlík tvoří hlavní složku substancí jako jsou uhlí, saze a aktivní uhlí [4].

Fullereny

Nově objevené sférické molekuly, složené z pěti nebo častěji šestičlenných kruhů atomů uhlíku. Prostorově jsou tyto molekuly uspořádány do kulovitěho tvaru a jsou mimořádně odolné vůči vnějším fyzikálním vlivům. Nejstabilnější známý fullerén je molekula, obsahující 60 uhlíkových atomů. Připravují se i uměle pyrolýzou organických sloučenin laserem. Vlastnosti fullerenů představují intenzivní oblast výzkumu [5].

Skelný uhlík

Uměle vyrobenou formou grafitu je tzv. skelný uhlík (angl. glassy carbon), který se vyznačuje amorfní strukturou, vysokou hustotou, nízkou pórovitostí a značnou chemickou a mechanickou odolností. Připravuje se pyrolýzou termosetových polymerů, které jsou tvořeny trojrozměrnou strukturní sítí. Používá se v chemických laboratořích, v metalurgii i v medicíně [5,6].

Lonsdaleite

Za určitých podmínek, uhlík krystaluje jako lonsdaleite. Tato forma je podobná diamantu, ale má šestiúhelníkovou krystalickou síť [4].

1.2 UHLÍKOVÁ VLÁKNA

Uhlíková vlákna se stala důležitou součástí řady konstrukčních materiálů. Tato lesklá černá vlákna jsou tvořena převážně z atomů uhlíku spojených v dlouhých grafitových krystalech, které jsou více či méně orientovány paralelně k ose vlákna. Toto krystalové uspořádání poskytuje vláknům výjimečné vlastnosti [1]. Komerčně jsou vlákna dodávána ve formě mutlifilů (několik tisíc vláken), uhlíkových tkanin, popř. dalších textilních struktur.

Uhlíková vlákna jsou materiálem s vysokou pevností v tahu, vysokým modulem pružnosti a poměrně nízkou hustotou ($1600\text{--}2200\text{ kg/m}^3$). Specifickými vlastnostmi jsou srovnatelné s materiály jako je ocel, jenže jsou cca 5x lehčí, navíc jsou elektricky vodivá a odolná vůči mechanickému či chemickému poškození [2].

Uhlíkové vlákno je nejvíce používané k vyztužení kompozitních materiálů, např. materiálu známého jako uhlíkový laminát. Tento druh materiálu se používá při výrobě částí letadel, závodních vozidel (Formule 1), sportovního vybavení jako jsou závodní kola, listů větrných generátorů, a dalších součástí, které jsou hodně mechanicky namáhány.

Uhlíková vlákna nacházejí též uplatnění u ozbrojených složek (výroba neprůstřelných vest), při výrobě hudebních nástrojů, membrán apod.

1.2.1 Výroba uhlíkových vláken

Uhlíková vlákna mají dlouhou výrobní tradici sahající až do doby Edisona, který v roce 1878 vyrobil neúmyslně první uhlíkové vlákno. Převedel bavlnu a později bambusové odřezky na uhlíková vlákna použitá v elektrických žárovkách. Po roce 1910 průmysl vyrábějící lampy začal používat wolframová vlákna a tím byla produkce uhlíkových vláken ukončena. Zájem o uhlíková vlákna byl obnoven kolem roku 1950.

Uhlíková vlákna se dnes vyrábějí převážně pyrolýzou z polymerních prekurzorů, které jsou charakteristické dlouhými řetězci molekul spojených atomy uhlíku. Mezi tyto prekurzory patří *viskózová vlákna*, *polyakrylonitrilová vlákna (PAN vlákna)* a *vlákna na bázi smol* z dehtu jako zbytků krakování ropy.

Viskóza se dnes téměř nepoužívá, jelikož při její pyrolýze dochází k velkým ztrátám hmoty. Výtěžek C-vláken činí pouze 20–25 %. U PAN prekurzorů je výtěžek 45–50 % a největší výtěžnost mají prekurzory ze smol, která představuje 75–80 % [1,7].

Postup výroby uhlíkových vláken:

Příprava prekurzoru (výchozího materiálu)

- tavným zvlákňováním nebo zvlákňováním z roztoku
- tažení vlákna do požadovaného průměru.

Stabilizace

- vznik teplotně stabilní zesíťené struktury
- na vzduchu, zahřátím na 200–450°C po dobu 20-30 minut
- přerovnání atomové struktury vlákna.

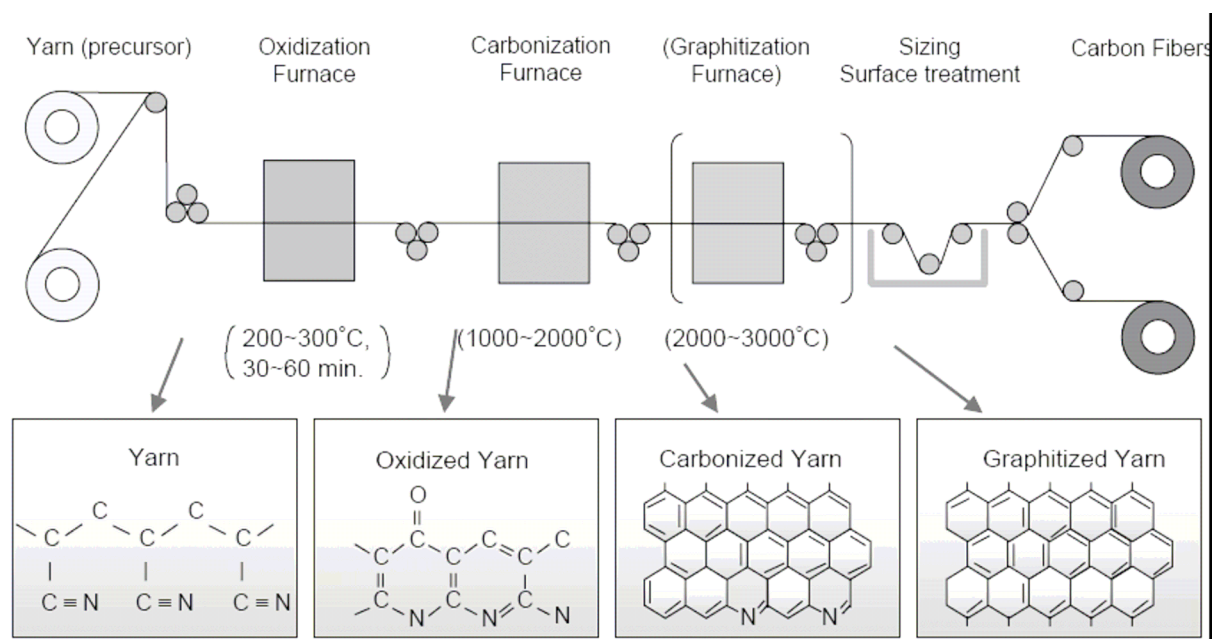
Karbonizace

- transformace prekurzoru na uhlíková vlákna
- v inertní atmosféře (obvyčně dusíkové) při teplotách mezi 1000 °C - 2000 °C
- odstranění většiny neuhlíkových atomů
- vlákno 85–95 % uhlíku.

Grafitizace

- zvýšení obsahu uhlíku na cca 99 % a více
- vznik uspořádané vrstevnaté strukturu
- při teplotách mezi 2000–3000°C v inertní atmosféře [7].

Schematický postup výroby uhlíkových vláken a příslušné změny struktury jsou zobrazeny na obrázku 1.



Obr. 1 Postup výroby uhlíkového vlákna z PAN dle [8]

1.2.1.1 Uhlíková vlákna z PAN

V současné době jsou nejpoužívanější surovinou pro výrobu uhlíkových vláken vlákna na bázi polyakrylonitrilových prekurzorů, z nichž se vyrábí 90 % uhlíkových vláken. Kvalitnější uhlíková vlákna dává kopolymer než-li homopolymer PAN. Postup výroby uhlíkového vlákna z PAN je možno rozdělit do tří hlavních etap:

Stabilizace PAN vlákna – probíhá v oxidačním prostředí při teplotě 220 až 300°C, za současného napínání. Dojde k cyklizaci vazeb v řetězci makromolekuly PAN (vytvoření paralelních žebříčkovitých makromolekul) a k vzájemnému zesílení makromolekul kyslíkovými můstky. Vláknem zčerná a stane se netavitelným.

Karbonizace – se ukutečňuje v inertním prostředí (N_2) při teplotách od 1000 do 1500 °C. Proběhne odstranění vodíku a snížení obsahu dusíku a kyslíku. Uhlík tvoří 80 až 95 % hmoty. Vláknem dosáhne maximální pevnosti v tahu a vytvoří se hexagonální uhlíková síť.

Grafitizace – v inertním prostředí (Ar) při teplotách od 1800 do 3000 °C. Zvýší se obsah uhlíku a umožní se vznik dokonalejších mikrokystalů, což má za následek zvětšení tuhosti vlákna. U standardních vláken z PAN je přírůstek tuhosti dosažen za cenu poklesu pevnosti, jelikož zvětšení velikosti mikrokystalů vede též k zvětšování defektů mezi nimi. Dloužení při grafitizaci je používáno u nejtěžších vláken. Dochází ke zmenšení úhlu odklonu mikrokystalů od osy vlákna (tzv. vysokomodulová vlákna z PAN) [8]. Charakteristické vlastnosti pro jednotlivé typy vláken z PAN jsou ukázány v tabulce Tab. 2.

Tab. 2 Typické vlastnosti uhlíkových vláken z PAN [4]

	LM	IM	HM
Podélný směr			
Pevnost v tahu [GPa]	3.3	4-5	2.4
Modul pružnosti [GPa]	230	270	390
Tažnost [%]	1.4	1.7-1.9	0.6
Tepelná vodivost [$W m^{-1} K^{-1}$]	8.5	-	70
Elektrický odpor [Ωm]	18	-	9.5
Teplotní roztažnost při 21 °C [$10^{-6} K^{-1}$]	-0.7	-	-0.5
Příčný směr			
Modul pružnosti [GPa]	40	-	21
Teplotní roztažnost při 50 °C [$10^{-6} K^{-1}$]	10	-	7
Materiálové			
Hustota [$g \cdot cm^{-3}$]	1.76	1.8	1.9
Průměr vlákna [μm]	7-8	6-7	4-6
Obsah uhlíku [%]	92	96	99

1.2.1.2 Uhlíková vlákna ze smol

Smoly jsou izotropní směsi získané jako vedlejší produkty při zpracování černouhelného dehtu a zpracování petroleje. Vlákna připravená z těchto smol jsou izotropní a mají nízké moduly a pevnosti. Jejich mechanické vlastnosti se nezlepší ani když jsou karbonizovány za vysokých teplot. Jediným způsobem jak tyto vlastnosti zlepšit je dloužení ve velmi vysokých teplotách 2700-3000 °C, což je velmi drahý a nepraktický proces. Vlákna z izotropní smoly jsou většinou užívána jako relativně levné plniče v plastech a zlepšují pevnost a nepoddajnost betonu.

Vhodným tepelným zpracováním černouhelných dehtů vzniká termoplastická *mezofázová smola* (smola s kapalnými krystaly) poskytující špičková, vysoce tuhá a přitom pevná vlákna. Vlastnosti těchto vláken jsou uvedeny v Tab. 3. V mezofázových smolách jsou aromatické roviny různé molekulové hmotnosti uspořádány paralelně, tj. i v tekuté smole jsou krystaly. Při zvláknění smoly ve viskózním stavu (po zahřátí na potřebnou teplotu) se aromatické roviny orientují podél osy vlákna. Při následné oxidaci vzniká zesítení a následuje předkarbonizace, karbonizace a grafitizace při teplotách 2500-2700 °C [1,8].

Tab. 3 Typické vlastnosti uhlíkových vláken z mezofázových smol [1]

	LM	HM	UHM
Podélný směr			
Pevnost v tahu [GPa]	1.4	1.7	2.2
Modul pružnosti [GPa]	160	380	725
Tažnost [%]	0.9	0.4	0.3
Tepelná vodivost [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]	-	100	520
Elektrický odpor [Ωm]	13	7.5	2.5
Teplotní roztažnost při 21 °C [10^{-6}K^{-1}]	-	-0.9	-1.6
Příčný směr			
Modul pružnosti [GPa]	-	21	-
Teplotní roztažnost při 50 °C [10^{-6}K^{-1}]	-	7.8	-
Materiálové			
Hustota [g.cm^{-3}]	1.9	2.0	2.15
Průměr vlákna [μm]	11	10	10
Obsah uhlíku [%]	>97	>99	>99

1.2.2 Struktura uhlíkových vláken

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.1.1, krystal grafitu je vysoce anizotropní. Ve směru kolmém k bazálním rovinám působí slabé Van der Waalsovy síly, zatímco v rovinách bazálních vrstev, v tzv. aromatických rovinách, jsou atomy C vázány velmi silnými kovalentními vazbami. Teoretická pevnost grafitového monokrystalu namáhaného tahem ve směru rovnoběžném s bazálními rovinami činí přibližně 100 GPa a teoretický modul pružnosti v tahu je přibližně 1000 GPa [2,3].

Polykrystalický grafit s náhodně orientovanými krystaly je měkký a drobný následkem málo pevných vazeb mezi hustě obsazenými rovinami. Pevnost v tahu je pouze 20 MPa a modul pružnosti v tahu 10 GPa. Při smykovém namáhání ve směru rovnoběžném s rovinami se pevné kovalentní vazby mezi uhlíkovými atomy v bazálních rovinách neporušují a dochází k snadnému pohybu těchto rovin vůči sobě, což je příčinou známého mazacího účinku grafitu.

Jestliže nevzniká skutečná trojrozměrná struktura krystalického grafitu, tak mluvíme o tzv. *turbostratickém uhlíku*. Zde nejsou hexagonální roviny uspořádány v pravidelné posloupnosti a vzdálenosti mezi aromatickými rovinami jsou potom mírně větší, než je tomu u mřížky grafitu. Vzniká tak náhodně uspořádaná struktura.

Ve většině případů uhlíková vlákna vykazují uspořádanost mezi turbostratickou a grafitovou strukturou. Pro tato vlákna je nesprávné používat termín *grafitová vlákna* [8].

Struktura uhlíkových vláken závisí na povaze výchozího materiálu a na teplotě jeho zpracování. Proto se vnitřní struktura uhlíkových vláken z PAN a ze smol výrazně liší.

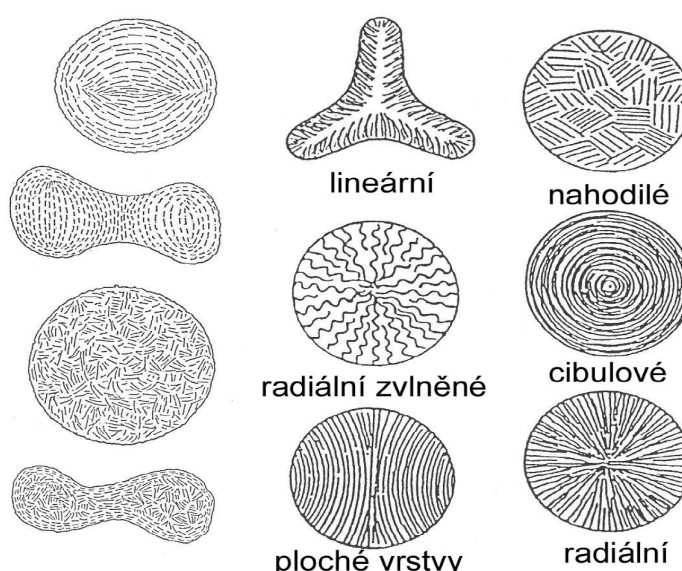
1.2.2.1 Mikrostruktura uhlíkových vláken z PAN

Ve směru osy vlákna jsou protáhlé mikrokristaly turbostratického uhlíku tvořeny vždy několika paralelními aromatickými rovinami. V příčném řezu vlákna pásy nedosahují větších rozměrů a jsou různě stočeny. V podélném směru vlákna se pás rovnoběžných aromatických rovin jeví jako zvlněný, jelikož mikrokristaly jsou vzájemně natočeny pod malými úhly. Ve vlákne dále nalezneme mikroskopické póry protažené v podélném směru a submikroskopické dutiny mezi jednotlivými mikrokristaly.

Následkem malého odklonu aromatických rovin mikrokryсталů od podélné osy vlákna je, že vlákna z PAN nedosahují nejvyšších modulů pružnosti, přesto však mají modul pružnosti E větší než ocel [8].

1.2.2.2 Mikrostruktura uhlíkových vláken ze smol

U vláken ze smol vytvářejí aromatické roviny rozměrnější deskovité krystaly turbostratického uhlíku. Krystaly jsou téměř paralelní s osou vlákna (aromatické roviny nejsou zvlněny). Jejich převládající uspořádání v příčném řezu je možno charakterizovat jako radiální, nahodilé, snopkovité (ploché vrstvy), lineární, cibulové nebo smíšené, viz obr. 2. Vedle deskovitých krystalů turbostratického uhlíku nalezneme ve vláknech ze smol též mikroskopické póry ve tvaru polyedrů, menší turbostratické mikrokryсталy a polykrystalický grafit [8].



Obr. 2 Model uspořádání grafenových rovin ve struktuře uhlíkových vláken

1. sloupec vlákna z PAN, 2. a 3. sloupec vlákna z mezofázových smol [6]

1.2.3 Vlastnosti uhlíkových vláken

V kapitole zabývající se výrobou uhlíkových vláken byly pro vlákna z jednotlivých prekurzorů uvedeny tabulky s typickými vlastnostmi. Z těchto tabulek jsou zřejmé některé základní vlastnosti, kterými se uhlíková vlákna vyznačují:

Anizotropie vlastností

- Mechanické - Modul pružnosti v tahu ve směru osy vláken se pohybuje řádově ve stovkách GPa, modul ve směru kolmém v desítkách GPa. Pevnost v tahu také výrazně menší ve směru kolmém k ose vlákna než-li podélném.
- Elektrické - Anizotropie elektrického odporu.
- Tepelné - Teplotní roztažnost ve směru osy vlákna má zápornou hodnotu, ve směru kolmém kladnou hodnotu.
 - Tepelná vodivost v podélném směru je největší u vysokomodulových vláken z mezofázových smol.

Hustota

- Uhlíková vlákna mají hustotu asi 5x nižší než ocel pohybující se v rozmezí 1600 – 2200 kg/m³.

Průměr vláken

- Vlákná z PAN mají průměr okolo 4 – 8 μm, zatímco vlákna na bázi smol ≥ 10 μm.

Další vlastnosti

- Křehkost – Malá odolnost proti ohybu. Menší prodloužení při přetržení v porovnání se skleněnými vlákny.
- Odolnost proti únavě, opotřebení a tření. Teplotní rozměrová stabilita.
- Ochrana před elektromagnetickými vlnami (elektromagnetické stínění) a vynikající propustnost rentgenového záření.
- Dobrá chemická stálost a vynikající odolnost kyselinám, alkáliím, solím a různým typům rozpouštědel.
- Biokompatibilita.

Z hlediska konstrukčních aplikací jsou nejdůležitějšími vlastnostmi uhlíkových vláken již zmíněny vysoký modul a pevnost. Modul pružnosti v tahu závisí na dokonalosti a velikosti mikroskopických krystalů a úhlu odchýlení jejich aromatických rovin od osy vlákna. Zatímco pevnost materiálu je určována množstvím defektů mikrostruktury. Na základě modulu pružnosti rozlišujeme vlákna:

- s nízkým modulem pružnosti (LM) – 210 - 250 GPa
- středněmodulová (IM) – 280 - 350 GPa,
- vysokomodulová (HM) – 400 - 500 GPa,
- s ultravysokým modulem pružnosti (UHM) – nad 500 GPa [10].

Rozdělení do těchto kategorií je jen přibližné. Jednotlivé kategorie se překrývají a dochází také k odlišným značením a rozdělením u jednotlivých dodavatelů, vlivem rozmanitosti vlastností těchto vláken [2].

1.2.4 Úprava povrchu uhlíkových vláken

Uhlíková vlákna se většinou používají jako výztuž na výrobu kompozitů. Proto jsou tato vlákna podrobována povrchovým úpravám, jejichž cílem je kromě ochrany povrchu (sizing) velmi jemných vláken např. vnesení aktivních skupin na povrch vláken (zvýšení povrchové energie). Tyto skupiny mohou zvyšovat polaritu povrchu a účastnit se vazebných a nevazebných interakcí s molekulami pojiv v kompozitech.

Zvýšení povrchové energie může být dosaženo mírnou oxidací povrchu vláken za vzniku funkčních skupin. Ty jsou schopné vázat pojiva silnějšími chemickými vazbami.

Jako sizing se používají např. polymerní povlaky na bázi epoxidů nebo polyimidů. Tato vrstvička látek chrání uhlíková vlákna před poškozením a drží pohromadě monofily. Zároveň ulehčuje pronikání pojiv k povrchu vláken a zajišťuje tak optimální podmínky dalšího zpracování do kompozitů a nebo zpracovatelských útvarů (tkanin, sekaných vláken apod.) [9,10].

1.2.5 Typy produktů z vláken

Uhlíková vlákna jsou dostupná od různých dodavatelů v široké škále forem. Tato rozmanitost a přizpůsobivost uhlíkových vláken je jednou z jejich výhod a většina těchto produktů slouží jako výztuž do kompozitů.

Sdružením elementárních vláken (monovláken) vznikají prameny (multifily). Ty jsou dále zpracovány na následující polotovary:

- **sekané prameny** - nasekány na potřebné délky,
- **mletá vlákna** - krátká vlákna získaná mletím,
- **prameny bez zákrutů**,
- **rovingy** (pramence, kabílky) - sdružené prameny s nulovým nebo malým počtem zákrutů,
- **rovingové tkaniny**

- **rohože** - netkané textilie, rouna. Tvoří je v rovině ležící nahodile uspořádaná kontinuální vlákna nebo na větší délky sekané prameny. Sekaná vlákna jsou v rohoži spojena polymerními pojivy, rozpustnými v rozpouštědlových pryskyřicích.
- **prepregy** - jsou různě široké role nebo kotouče, obsahují buď paralelně uspořádané rovingy, tkaninu nebo rohož a polymerní matrici.
- **smíšené výztuže** – kombinací rovingů, rohoží, tkanin atd.
- **3D produkty** [8].

1.2.6 Aplikace uhlíkových vláken

Uhlíková vlákna byla původně vyvíjena pro letecký a kosmický průmysl. Dnes jsou používána v nejrůznějších průmyslových aplikacích či při výrobě sportovních a rekreačních potřeb.

Letectví a kosmonautika

- Letadla - křídla, konstrukční prvky trupů a ocasních ploch, vrtule, zdvihače, palubní mechanismy, disky brzd, podlažní panely, sedadla, potahy, radarová technika
- Rakety - kuželové trysky, kryty a lopatky motorů
- Družice - antény, sluneční bateriové panely, nosné konstrukční prvky

Sportovní aplikace

- Rybářské vybavení – pruty, navíjedla
- Lyžařské vybavení
- Golfové hole
- Rakety – tenisové, badmintonové, squashové
- Vodní sporty - plachetnice, motorové lodě, závodní čluny, stěžení

Průmyslový materiál

- Automobily - spojovací hřídele, odlehčené nádrže, karoserie a výztuhy závodních automobilů, sedadla, ojnice, součásti brzd a brzdového obložení, těsnění
- Motocykly - závodní kukly, tlumící kryty
- Kola - rámy, kola, řídítka
- Části strojů – ložiska, zámky, ozubená kola, řemeny, paže robotů, ostří talířů, rychle rotující součásti, kompresory, textilní stroje

- Elektronika – audio zařízení, parabolická anténa, části CD, membrány reproduktorů
- Výroba energie – turbíny a listy větrných elektráren, nosiče solárních článků, speciální baterie a články, elektrody, stínění elektromagnetického pole, tepelné stínění
- Chemické vybavení – korozivzdorné nádoby, tavící vany, filtry
- Zdravotnictví – umělé kosti, náprava šlach, vazů, kůže, krycí desky, kazety, rentgenová zařízení, operativní zařízení, pojízdná křesla
- Stavba – kabely, výztužný betonový materiál, antistatické podlahoviny, mosty
- Další – neprůstřelné vesty, hudební nástroje, části čerpadel odolné korozi, deštníky, helmy atd.

1.3 VÝROBCI UHLÍKOVÝCH VLÁKEN

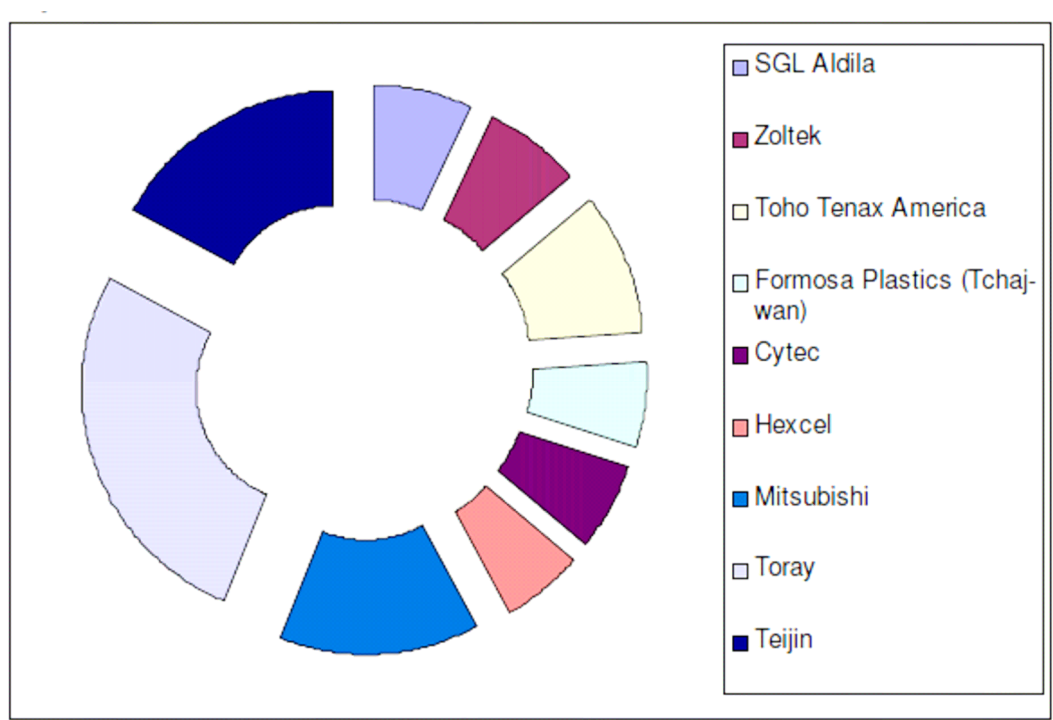
1.3.1 Historie

- 1957 - první uhlíkové vlákno z viskózy v USA (Union Carbide)
- 1961 - první uhlíkové vlákno z PAN v Japonsku (společnost Toray)
- 1971 - komerční výroba uhlíkových vláken z PAN (Toray), výroba 12 tun/rok
- 1972 - počátek výroby uhlíkových vláken u firmy Aldila na golfové hole
- 1976 - počátek výroby uhlíkových vláken z mesofázových smol
- 1978 - export technologie Toray (Japonsko) do Union Carbide (USA)
- 1986 - počátek výroby velmi pevného „středněmodulového“(IM) vlákna u firmy Toray (Torayca® T1000)
- 1990 - prepreg Torayca® (vlákna T800H a T800S + houževnatá EP)
- 1992 - počátek výroby uhlíkových vláken z PAN firmy Zoltek Co.
 - spojení firem SIGRI GmbH (Německo) a Great Lakes Carbon (USA) do firmy SGL Carbon AG
- 1998 - firma Hercules prodala výrobu společnosti Hexcel
- 1999 - spojení firmy Aldila Inc.(USA) a firmy SGL Carbon AG
- 2000 - Toho Tenax získal firmu Fortafil Fibers
 - založení firmy Cytec Industries
 - společnost Teijin (Japonsko) převzala kontrolu nad Toho Tenax (Japonsko a Evropa)
- 2001 - BP Amoco prodalo výrobu a obchod firmě Cytec
- 2006 - počátek výroby přetržených kontinuálních uhlíkových vláken “SBCF” (společnost Hexcel)
- 2006 - vlákno z uhlíkových nanotubiček (patent Los Alamos National Laboratory, založena firma CNT Technologies, Inc., Seattle, USA)
- 2007 - vznik firmy SGL Group – The Carbon Company [11]

1.3.2 Všeobecné informace

Produkce uhlíkových vláken v roce 2007 byla odhadována na 48 000 tun za rok a je očekáváno, že v roce 2018 dovrší 100 tisíc tun za rok. 70 % této produkce kontrolují tři japonské společnosti: Toray Industries Inc., Teijin Ltd. a Mitsubishi Rayon

Co. Jejich cílem je zrychlení výrobního procesu (zvýšení výkonů) a snížení nákladů, neboť uhlíková vlákna mají 30x vyšší cenu než např. ocel. Dalšími výrobci uhlíkových vláken jsou např. Cytec Industries, Aldila + SGL Group – The Carbon Company, Zoltek, Hexcel Corporation, Nippon Graphite Fiber Co., Formosa Plastics a Kureha Corporation. Podíl hlavních výrobců uhlíkových vláken z PAN ukazuje následující graf na obrázku 3.



Obr. 3 Graf podílu výrobců uhlíkových vláken z PAN dle [11]

U jednotlivých výrobců se setkáme s různým značením vláken a zařazením do kategorií vlivem neustálého vývoje jejich produktů. Multifily obsahující 1, 3, 6, 12 a 15K elementárních vláken (K = 1000 vláken v pramenci) slouží obvykle pro vysoce vyspělé konstrukční materiály a špičkové sportovní zboží. Nejpoužívanější jsou vlákna o obsahu 6 a 12K. Větší počty (24K a nad 32K) jsou dodávány v první řadě pro automobilové aplikace a nasekaná vlákna formující směsi.

1.3.3 Toray Industries, Inc.

Společnost Toray Industries, Inc. z Japonska je světově uznávaný výrobce uhlíkových vláken už přes 30 let. Toray, včetně dceřiné společnosti Toray Carbon Fibers America, Inc. je největší světový výrobce uhlíkových vláken z PAN, tvořící 30

% celosvětové produkce, s průmyslovou výrobou a distribucí ve Spojených státech amerických, Evropě a Japonsku.

Filozofie Toray:

Přispět společnosti prostřednictvím vytvoření nových hodnot, pokrokových myšlenek, technologií a produktů.

Uhlíková vlákna TORAYCA® jsou globálně uznávaná pro jejich vyjímečné vlastnosti, kvality, výrobní konzistence (soudržnost, tuhost, neporušenost), dělající je preferovanou volbou konstruktérů a výrobců celého světa. Firma Toray používá pro svá vlákna symbol T, po němž následuje číslo tím vyšší, čím větší je pevnost. Jedná se o vlákna s vysokou pevností, standardním a středním modulem. Nejtužší vlákna této firmy (grafitizovaná vlákna z PAN) mají počáteční písmeno M. Jde o středněmodulová a vysokomodulová vlákna zahrnující vyšší pevnost MJ série vláken.

Vlákna se standardním modulem

- 1 - 24K v prameni
- T300, T300J, T400H, T600S, T700S, T700G
- průměr 7 µm

Středněmodulová vlákna

- 6K, 12K, 18K a 24K v prameni
- T800H, T800S, T1000G, M30S, M30G
- průměr 5 µm

Vysokomodulová vlákna

- 3, 6, 12K v prameni
- M35J, M40, M46J, M50J, M55J, M60J
- průměr 5 µm, M40 7µm

Vysoce pevná

- 12, 24, 18K
- T700S, T800S, T1000G, M30G
- průměr 5 µm, T700S 7 µm [12]

Základní parametry těchto vláken jsou k dispozici v příloze A.

1.3.4 Toho Tenax Co., Ltd.

Toho Tenax, člen Teijin Group, je mezinárodní společnost, která dodává zákazníkům po celém světě uhlíková vlákna pod obchodním názvem TENAX. Tato uhlíková vlákna jsou produkována Toho Tenax v Japonsku, v USA a Německu. Společnost Toho Tenax s již čtvrtstoletními zkušenostmi je druhým největším světovým výrobcem produkující uhlíková vlákna z PAN s 20 % podílem na trhu.

Nabízejí prameny dělané s 1000, 3000, 6000, 12 000 a 24 000 vláknů, v závislosti na jejich aplikacích. Názvy produktů Toho Tenax začínají symbolem určující hlavní vlastnosti vlákna: HTA, UT, IM, HM, UM.

HTA – vysoce pevná vlákna

UT – vlákna s vyšší pevností

IM – středněmodulová / vysocopevná vlákna

HM – vysokomodulová vlákna

UM – vysokomodulová / vysocepevná vlákna [13]

Podrobnější parametry těchto vláken jsou v příloze B.

1.3.5 Mitsubishi Group

Mitsubishi Group je japonský konglomerát sestávající se z řady autonomních obchodů, které sdílejí značku Mitsubishi. Pod tento celek spadají i společnosti zabývající se výrobou uhlíkových vláken.

1.3.5.1 Mitsubishi Rayon Co., Ltd.

Mitsubishi Rayon je společnost založená v roce 1933 jejíž filozofií je:

Nejlepší kvalita pro lepší život.

Tato společnost se stále rostoucí kapacitou v Japonsku, USA a Francii je mateřskou společností firmy Grafil Inc., umístěnou v hlavním městě Kalifornie Sacramento. Tyto společnosti se zaměřují na výrobu uhlíkových vláken z PAN prekurzoru pod obchodními názvy PYROFIL a GRAFIL.

Zařazení do kategorií:

Vysokomodulová vlákna – HS40 (12K), HR40 (12K)

Středněmodulová vlákna – MS40 (12K), MR60H (24K)

Vlákna se standartním modulem – 34-700 (12K a 24K), 34-600 (48K), TRH50 (12K a 18K), TR50S (6K, 12K a 15K), TR30S (3K a 6K), TR330 [14,15].
Detailnější informace o těchto vláknech jsou k dispozici v příloze C.

1.3.5.2 Mitsubishi Chemical Corporation

Mitsubishi Chemical je jednou z největších chemických společností na světě s různorodým zaměřením zahrnující výrobky z ropy, uhlíkové produkty, agrochemikálie, elektroniku, léky, plastové produkty a speciální chemikálie. Tato Japonská společnost je vůdcem v chemické technologii kamenouhelného dehtu více než půl století a produkuje uhlíkové vlákenné produkty více než 10 let.

DIALED uhlíkové vlákno bylo vyvinuté po letech rozsáhlého výzkumu a získalo reputaci za vysoký výkon a dostupnost. Toto uhlíkové vlákno z uhelných mezofázových smol je k dispozici v širokém okruhu formátů, od nízkých modulů po ultravysoký stupeň modulu. Vysoký stupeň tepelné vodivosti, vynikající vlastnosti a nízká cena dali Dialed výhodu pro četné aplikace. Dialed se vyrábějí ve dvou provedeních:

1. Uhlíková vlákna s menším počtem monovláken – 2K typ

- velká pevnost, vysoký modul, vysoká tepelná vodivost, nízký CTE, vysoká čistota (obsah uhlíku přes 99 %)
- aplikace: letecký průmysl a kosmický prostor, sport.

2. Uhlíková vlákna s velkým počtem monovláken – typ 10K a 12K

- vysoký modul, nízká cena, vysoká čistota
- aplikace: průmyslové použití, sport [16]

Parametry těchto vláken jsou v příloze D.

1.3.6 Ostatní výrobci

V následující tabulce 4 jsou základní informace o dalších producentech uhlíkových vláken a parametry vláken od Cytec Engineered, Hexcel Corporation a Nippon Graphite Fibers Co. jsou k dispozici v příloze E, F, G [17].

Tab. 4 Výrobci uhlíkových vláken

Výrobce	Země, stát	Obchodní značka	Typy (značení)	Prekurzory
Cytec Engineered Materials	USA	Thornel	T-..., T-.../.. P-..., K- ...	PAN Mezofázové smoly
SGL Group – The Carbon Company + Aldila	Německo USA	Panox Sigrafil C Sigrafil T	- FM, SM, FB, LB, FA, SA - C10, C25, C30	PAN
Technical Fibre Products	UK	Optimat 203	-	PAN
Hexcel Corporation	USA	HexTow	AS., IM., PV../...	PAN
Zoltek Companies	USA	Panex	Panex 33, 35	PAN
Nippon Graphite Fibers Co.	Japonsko USA Francie	Granoc	YSH-..A, YS-..A, CN..., XN-..	Uhlé mezofázové smoly
Kureha Chemical Industries	Japonsko	Kreca	-	Ropná mezofázová smola
Formosa Plastics	Tchajwan	-	-	PAN

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem této části práce bylo určení základních materiálových a mechanických vlastností vybraných uhlíkových vláken (hustoty, jemnosti, pevnosti, tažnosti, modulu apod.) a porovnání takto naměřených vlastností s údaji uváděnými výrobcem. Bylo sledováno, do jaké míry se shodují naměřené hodnoty vybraných vlastností s údaji od výrobce.

Pro experiment byla vybrána vlákna od největšího světového výrobce uhlíkových vláken, společnosti Toray industries, Inc. z Japonska a to vlákno T800, které patří mezi komerčně nejúspěšnější středněmodulová vlákna a vlákno M46J, které patří do skupiny vysokomodulových vláken na bázi PAN, jejichž pevnostní charakteristiky předčí vlákna na bázi smol.

2.1 CHARAKTERISTIKA VYBRANÝCH TYPŮ C-VLÁKEN

T800H

Uhlíkové vlákno T800H se vyznačuje vysokou pevností v tahu, středním modulem, vysokou úrovní a vyváženým složením vlastností. T800H bylo navrženo a vyvinuto tak, aby vyhovělo požadavkům leteckých aplikací. Je použité pro konstrukční materiál primární struktury letadla Boeing 777, včetně kýlové plochy a horizontálního stabilizátoru. TORAYCA® T800H je jediné uhlíkové vlákno, které dosáhlo certifikace od FAA (Federální letecký úřad USA) pro rozhodující komponenty Boeingu 777. Vlákno vyvinuté původně pro letecké aplikace našlo použití také v rekreačních a průmyslových odvětvích a je dostupné v prameni s 6 a 12 tisíci vlákny. Základní parametry toho vlákna jsou uvedeny v následující tabulce 5.

Tab. 5 Základní parametry uhlíkového vlákna T800H

Počet vláken	Pevnost v tahu [MPa]	Modul tažnosti [GPa]	Tažnost [%]	Jemnost [tex]	Hustota [g/cm ³]	Průměr vláken [μm]
6 000 12 000	5 490	294	1,9	223 445	1,81	5

M46J

Vláknem M46J na bázi PAN je vyráběno nejen v Japonsku, ale i ve Francii. M46J uhlíkové vlákno je charakteristické vysokým modulem a nabízí zvětšenou pevnost v porovnání s vysokomodulovými vlákny na bázi smol. Nejvíce je používáno pro letecké a kosmické aplikace, průmyslové konstrukce a špičkové sportovní potřeby.

Tab. 6 Základní parametry uhlíkového vlákna M46J

Počet vláken	Pevnost v tahu [MPa]	Modul tažnosti [GPa]	Tažnost [%]	Jemnost [tex]	Hustota [g/cm ³]	Průměr vláken [μm]
6 000 12 000	4 210	436	1,0	223 445	1,84	5

2.2 TESTOVACÍ METODY

2.2.1 Stanovení průměru vláken

Jelikož studovaná uhlíková vlákna mají kruhový průřez, byl k orientačnímu stanovení jejich průměru použit projekční mikroskop - *Lanametr*, viz obr. 4.

Ze zkoumaných typů uhlíkových vláken se připravil preparát, který se umístil na stolek lanometru. Vlákna byla promítána na matnici s otočnou stupnicí, na které se měřila tloušťka vláken v dílcích. Při použití objektivu 20x, jeden dílek odpovídá tloušťce 2 μm.



Obr. 4 Lanametr dle [18]

2.2.2 Stanovení měrné hmotnosti

Pro stanovení měrné hmotnosti vláken byla použita *metoda pyknometrická*, která spočívá ve vážení pyknometru naplněného destilovanou vodou a pyknometru s destilovanou vodou a vlákenným materiálem.

Pomůcky

K provedení pokusu byly použity tyto měřicí potřeby: pyknometr, předváha – elektronické váhy, analytické váhy, vakuový exsikátor destilovaná voda a vlákenný materiál.

Způsob měření

Nejprve byla zjištěna hmotnost suchého vlákenného materiálu. Dále byla zjištěna hmotnost pyknometru s destilovanou vodou, kam byl poté pomocí pinzety vložen vlákenný materiál. Pyknometr s vlákny a vodou se uzavřel do vakuového exsikátoru s vývěvou pro odstranění přebytečných bublinek vzduchu, které by vedly k nepřesnému určení hustoty vláken. Po odstranění vzduchu se naplněný pyknometr zvážil. Na základě naměřených hodnot se měrná hmotnost ρ vypočítala podle vztahu:

$$\rho = \frac{M_{vl}}{M_K + M_{vl} - M_{KV}} \cdot \rho_{kap} \quad (1)$$

M_{vl} hmotnost vláken [g]

ρ_{kap} měrná hmotnost kapaliny [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$], $\rho_{kap} = 1,0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

M_K hmotnost pyknometru naplněného destilovanou vodou [g]

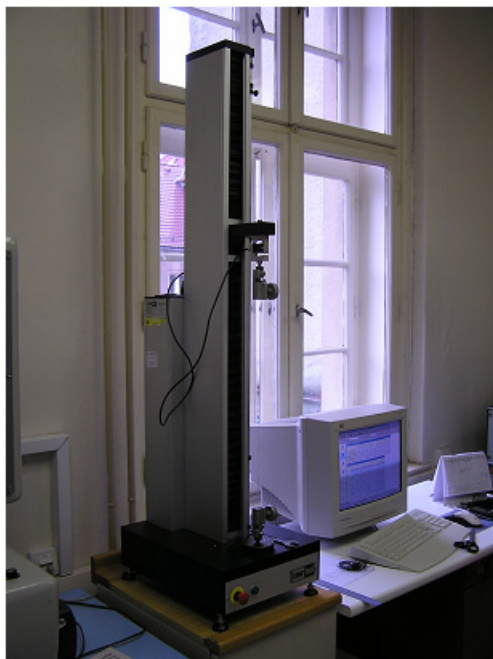
M_{KV} .. hmotnost pyknometru naplněného destilovanou vodou a vlákny [g] [19].

2.2.3 Pevnost a tažnost jednotlivých vláken

Měření bylo provedeno na přístroji *LabTest 2.010* (obr. 5) na Katedře textilních materiálů TU v Liberci. Přístroj je vybavený dvojicí svíracích čelistí, z nichž jedna čelist je pevná a druhá čelist se pohybuje konstantní rychlostí po celou dobu zkoušky, ve zkušebním systému přitom nedochází k žádnému ohybu.

Ze svazku uhlíkových vláken byla oddělena elementární vlákna a vlepena do pomocného rámečku o vnitřních rozměrech 10 x 10 mm. Takto připravený preparát se vkládal do čelistí trhacího stroje, kde se předem nastavila upínací délka 10 mm, rychlost zatěžování (posuvu čelisti) 50 mm/min. V programu byly dále nastaveny parametry, které měly být zaznamenávány. Následovalo spuštění přístroje, kdy se jedna čelist pohybovala až do místa přetrhu. Zjišťované hodnoty pevnosti $F[\text{N}]$ a prodloužení

vláken Δl [mm], byly výstupem počítačového programu LabTest, který hodnoty zpracovává dle normy ČSN EN 10002 [19].



Obr. 5 LabTest 2.010

2.2.4 Nepřímá měření

Z experimentálně naměřených hodnot \bar{d} , $\bar{\rho}$, \bar{F} , $\bar{\Delta l}$ byly vypočteny další parametry uhlíkových vláken. Nejistoty nepřímých měření byly vyjádřeny dle normy ČSN EN ISO/IEC 17 025 [20]:

Jemnost [tex] – délková hmotnost

$$T = \frac{m}{l} \quad \rightarrow \quad \bar{T} = \frac{10^6 \pi \bar{\rho}}{4} \cdot (\bar{d}^2 + s_d^2) \quad s_T^2 = \frac{10^{12} \pi^2 \bar{d}^2}{4} \left(\frac{\bar{d}^2 s_v^2}{4} + \bar{\rho} s_d^2 \right)$$

Pevnost σ [Pa]

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{4\pi}{\pi d^2} \quad \rightarrow \quad \bar{\sigma} = \frac{4\bar{F}}{\pi \bar{d}^2} + \frac{6\bar{F}}{\pi \bar{d}^4} s_d^2 \quad s_\sigma^2 = \frac{4s_F^2}{\pi^2 \bar{d}^2} + \frac{64\bar{F}^2 s_d^2}{\pi^2 \bar{d}^6}$$

Měrná síla F_T [N.tex⁻¹]

$$F_s = \frac{F}{T} \quad \rightarrow \quad \bar{F}_T = \frac{\bar{F}}{\bar{T}} + \frac{\bar{F}}{\bar{T}^3} s_T^2 \quad s_{FT}^2 = \frac{s_F^2}{\bar{T}^2} + \frac{s_T^2}{\bar{T}^4}$$

Poměrné prodloužení ε [%]

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_o} \cdot 100 \quad \rightarrow \quad \bar{\varepsilon} = \frac{\Delta \bar{l}}{l_o} \cdot 100 \quad s_{\varepsilon}^2 = \frac{10^4 s_{\Delta l}^2}{l_o^2}$$

Modul E [Pa]

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \rightarrow \quad \bar{E} = \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\varepsilon}} + \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\varepsilon}^3} s_{\varepsilon}^2 \quad s_E^2 = \frac{s_{\sigma}^2}{\bar{\varepsilon}^2} + \frac{s_{\varepsilon}^2}{\bar{\varepsilon}^4}$$

2.2.5 Mikrofotografie uhlíkových vláken

Pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu *Vega* (obr. 6) byla vyhodnocena mikrostruktura studovaných vláken [9]. Vega je plně počítačem řízený rastrovací elektronový mikroskop. Tento systém na Katedře textilních materiálů slouží ke zkoumání povrchů nejrůznějších objektů při velkém zvětšení s vysokou hloubkou ostrosti.



Obr. 6 VEGA fy TESCAN [19]

Skládá se ze čtyř základních částí:

- fyzikální část
- elektronika
- počítač
- software

Ve fyzikální části mikroskopu vzniká obraz povrchu vzorku. Elektronická část mikroskopu zajišťuje napájení, ovládání fyzikální části, zesilování a předávání signálů počítače. Doplnkový software umožňuje zaznamenávání a archivaci zvětšených obrazů ve standardním obrazovém formátu na počítačová záznamová media.

Příprava preparátu pro mikroskopování spočívá v připevnění zkoumaného vzorku na pracovní stůl a následném pokrytí tenkou vrstvou (10-30 nm) částic kovu např. Au, Ag nebo Pt. Takto připravené preparáty jsou umístěny do komory s vysokým vakuem, kde jsou postupně zkoumány tenkým svazkem elektronů. Zdrojem elektronů je elektronová tryska, nejčastěji wolframové žhavené vlákno, umístěné v tzv. Wehneltově válci. Odražený paprsek elektronů je snímán sondou a převáděn na viditelný obraz, který je možné dále upravovat.

Parametry přístroje

- rozlišení: 3,5 nm
- zvětšení: 20 - 500 000
- urychlovací napětí: 0,5 až 30 kV [19]

2.3 VÝSLEDKY A DISKUZE

2.3.1 Průměr vláken

Průměr vlákna je jedním ze základních geometrických parametrů vláken a slouží k výpočtu řady dalších charakteristik. Protože mají studovaná uhlíková vlákna kruhové průřezy, byl v prvním přiblížení použit pro určení průměrů Lanametr. Získané hodnoty byly porovnány s údaji uvedenými výrobcem pro vlákna T800H a M46J (viz příloha A), kde nalezneme v tabulkách hodnoty průměrů odpovídající 5 μm . Při měření na projekčním mikroskopu Lanamtru bylo dosaženo shodných výsledků. Výsledky jsou uvedeny v následující tabulce 7.

Tab. 7 Statistika naměřených průměrů vláken

vlákna	T800H	M46J
průměr vláken \bar{d} [μm]	5,09	5,2
rozptyl s^2 [μm^2]	0,27	0,3
směrodatná odchylka s [μm]	0,52	0,5
variační koeficient v [%]	10,3	11,3
IS [μm]	<5,01 ; 5,20>	<5,11;5,31>

2.3.2 Měrná hmotnost vláken

Pro každý typ vlákna byla provedena opakovaná měření ke stanovení měrné hmotnosti. Postupovalo se na základě pyknometrické metody. Ze získaných hmotností M_v , M_K a M_{KV} byly vypočítány hodnoty měrné hmotnosti vláken ρ [g.cm^{-3}]. Ze získaných výsledků (Tab. 8) vidíme vyšší variabilitu hodnot u vlákna M46J. Srovnáme-li tyto hodnoty s údaji od výrobce (viz příloha A), můžeme opět konstatovat velmi dobrou shodu.

Tab. 8 Průměrné měrné hmotnosti vláken

vlákna	T800H	M46J
průměrná hustota $\bar{\rho}$ [g.cm^{-3}]	1,83	1,84
rozptyl s^2 [$\text{g}^2.\text{cm}^{-6}$]	$2,1.10^{-4}$	$8,1.10^{-4}$
směrodatná odchylka s [g.cm^{-3}]	0,01	0,02
variační koeficient v [%]	0,8	1,6
IS [g.cm^{-3}]	<1,82;1,85>	<1,81;1,86>

2.3.3 Pevnost a tažnost vláken

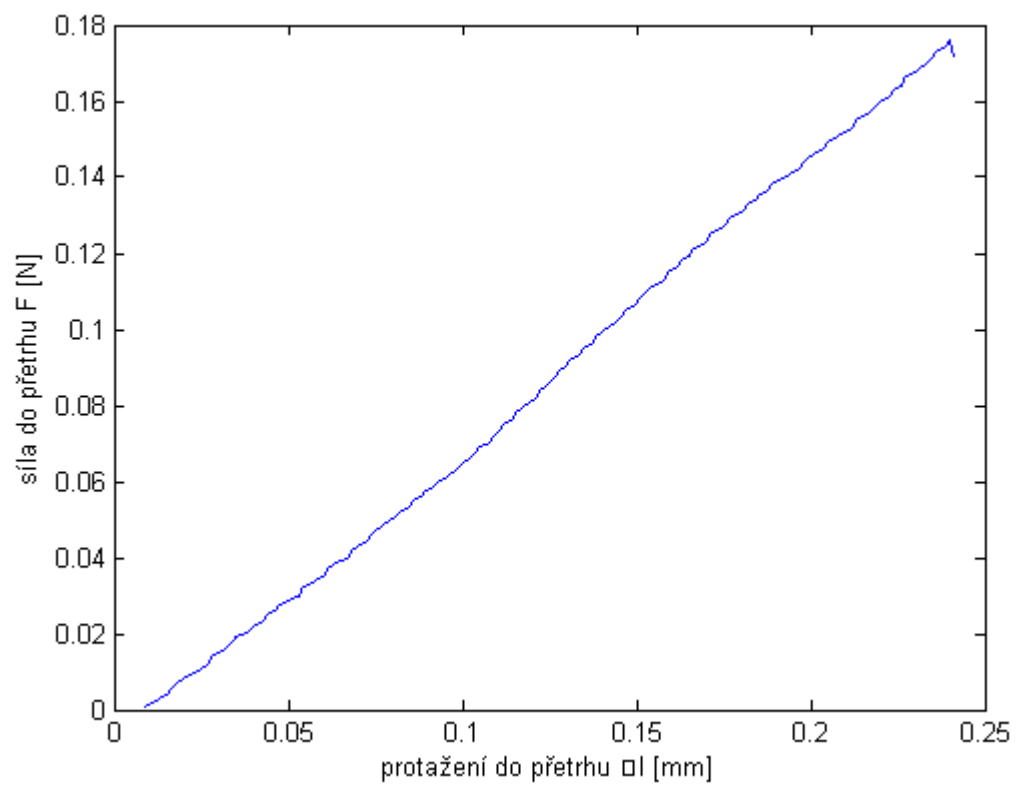
Výstupem programu LabTest pro každé vlákno bylo množství hodnot charakterizující sílu $F[N]$ a k tomu příslušející prodloužení vlákna. Závislost těchto dvou parametrů představuje pracovní křivka vláken. Na základě těchto výstupů byla stanovena průměrná hodnota maximální síly potřebné k přetržení vlákna $F_{\max} [N]$ a celkového prodloužení $\Delta l [mm]$. Pro oba typy uhlíkových vláken jsou tyto hodnoty v tabulce 9.

Typickou pracovní křivku uhlíkových vláken znázorňuje graf na obr. 7. Je z něj patrné, že uhlíková vlákna se vyznačují vysokou pevností a minimální tažností. Jelikož ne u každého vlákna bylo dosaženo takové křivky (viz např. pracovní křivka vlákna č.2 T800H na obr. 8) bylo potřebné pro získání spolehlivých výsledků hodnoty vláken upravit. Na grafu můžeme pozorovat počáteční mírné stoupání křivky, které je dáno vyrovnáváním vlákna při pohybu čelistí trhacího stroje způsobené nedokonalým vytvořením preparátu. Aby se odstranilo počáteční napřimování, které by vedlo k nepřesnému určení $\Delta l [mm]$, byla vedena ke křivce tečna, díky níž bylo možné vyjádřit skutečné celkové prodloužení.

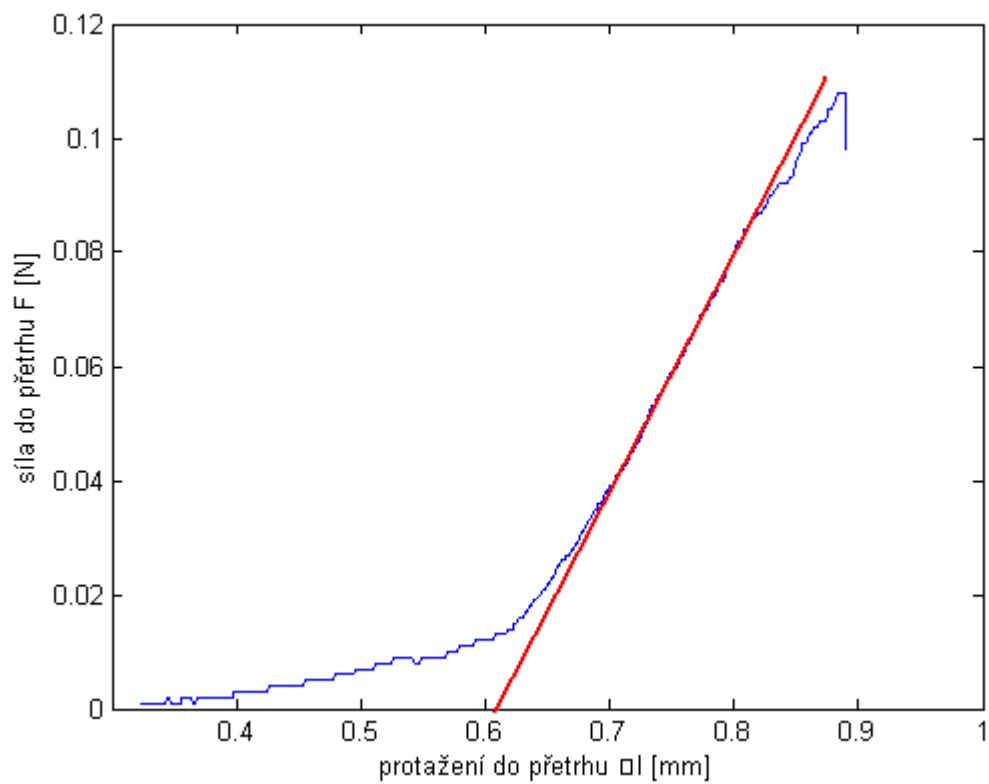
Tab. 9 Tabulka průměrných hodnot síly $F [N]$ a prodloužení $\Delta l [mm]$

Typ vlákna	T800H	M46J
síla $F [N]$	$0,1169 \pm 0,0019$	$0,0932 \pm 0,0010$
prodloužení $\Delta l [mm]$	$0,2562 \pm 0,0029$	$0,1781 \pm 0,0022$

Z naměřených hodnot byly spočítány základní statistické parametry - průměr, rozptyl, směrodatná odchylka, variační koeficient a intervaly spolehlivosti (viz příloha H). Z těchto údajů byly dále určeny pevnostní charakteristiky zkoumaných vláken.



Obr. 7 Pracovní křivka vlákna T800H (vzorek č.3)



Obr. 8 Pracovní křivka vlákna T800H (vzorek č.2)

2.3.4 Vypočítané parametry vláken

Prostřednictvím získaným hodnot průměrů, měrných hmotností, sil potřebných k přetržení vlákna a celkovému prodloužení byla vypočtena pevnost v tahu, jemnost, měrná síla, poměrné prodloužení a modul. Tyto parametry charakterizující uhlíková vlákna jsou uvedeny v následující tabulce 10.

Tab. 10 Počítané parametry vláken

Typ vlákna	Pevnost v tahu σ [GPa]	Jemnost T [tex]	Měrná síla F_s [N/tex]	Poměrné prodloužení ε [%]	Modul E [GPa]
T800H	$5,9 \pm 2,4$	$0,0379 \pm 0,0003$	$3,1 \pm 1,3$	$2,6 \pm 0,5$	237 ± 107
M46J	$4,5 \pm 1,7$	$0,040 \pm 0,008$	$2,5 \pm 0,9$	$1,8 \pm 0,4$	263 ± 131

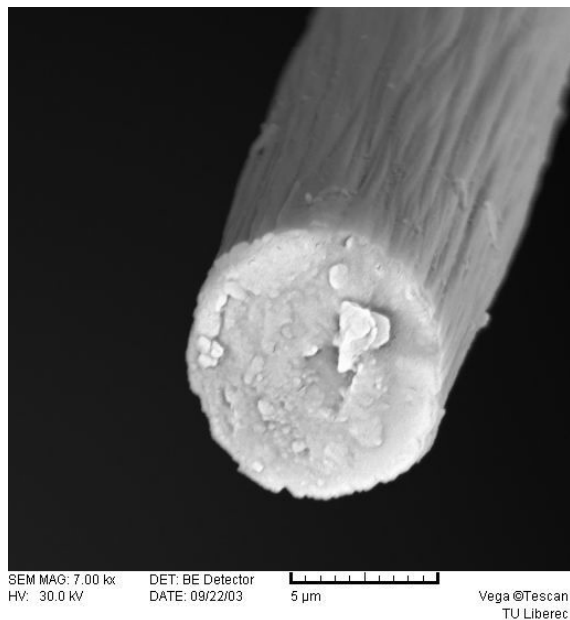
Porovnáme-li získané hodnoty vlákna T800H s tabulkovými hodnotami od výrobce, dá se konstatovat, že výsledky jsou uspokojivé. Jsou zde vidět charakteristické rysy, kterými se toto vlákno vyznačuje - vysoká pevnost v tahu a střední modul.

V případě vlákna M46J jsou patrné větší rozdíly oproti hodnotám v tabulce. Jemnost vláken odpovídá a hodnotu pevnosti v tahu můžeme vzít také za přijatelnou. Zatímco hodnota poměrného prodloužení a modulu více kolísá. Jelikož poměrné prodloužení (tažnost) vychází z celkového prodloužení vlákna při mechanickém namáhání, byla jeho vysoká hodnota zřejmá již po získání Δl hodnoty při experimentu.

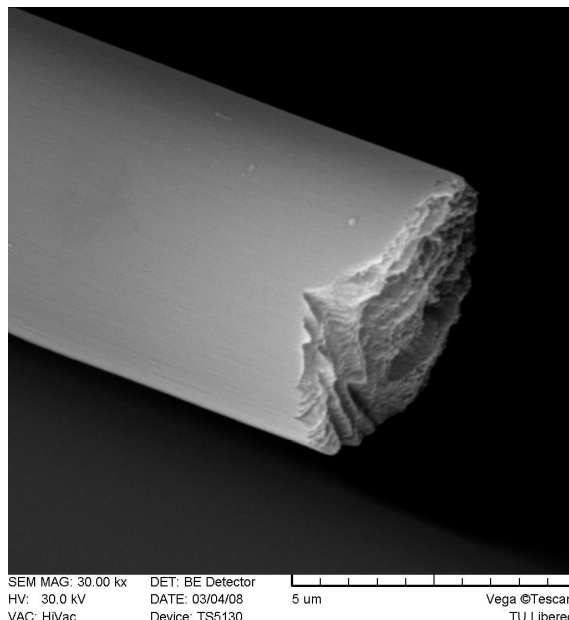
Je možné, že docházelo při uskutečňování pokusu k prokluzu vláken nesprávnou volbou použitého lepidla. Příprava preparátů vlivem velké jemnosti těchto vláken nebyla také lehkou záležitostí, takže se v pomocném rámečku mohla vyskytnout místo jednoho vlákna dvě. Další odchylky mohly vzniknout při úpravě grafů prokládáním tečny. Také můžeme usuzovat, že výrobce poslal jiný typ vlákna. Podíváme-li se do tabulky s přehledem všech vláken, která společnost Toray industries, Inc. z Japonska nabízí, nalezneme tam vlákna jiná, která více odpovídají naměřené hodnotě prodloužení. Nadruhou stranu se ale liší v dalších parametrech. Můžeme také předpokládat, že vlákna mohla být poškozena neprávou manipulací a skladováním.

2.3.5 Vzhled povrchu uhlíkových vláken

Povrchy uhlíkových vláken byly zkoumány na mikrofotografiích získaných rastrovací elektronovou mikroskopií na přístroji Vega Tescan.



Obr. 9 Mikrofotografie vlákna T800H



Obr. 10 Mikrofotografie vlákna M46J

Na povrchu středněmodulového vlákna T800H (obr. 9) můžeme pozorovat rýhování typické pro vlákna na bázi PAN [2,3], způsobené navlněním rovnoměrně rozložených grafenových rovin ve struktuře vlákna. U vlákna M46J (obr. 10) je povrch výrazně hladší, což by odpovídalo napřímění grafenových rovin v důsledku zvyšování modulu, uspořádání grafenových rovin v příčném průřezu pak odpovídá modelovému uspořádání typickému pro vlákna na bázi PAN (viz obr. 2). Tato zjištění se shodují s údaji výrobce o použitém polymerním prekurzoru pro studovaná vlákna.

ZÁVĚR

V předložené práci byl vytvořen přehled nejvýznamějších současných firem dodávajících na trh uhlíková vlákna. Z dostupných materiálů můžeme zjistit, že největší procento dodávaných vláken tvoří vlákna z PAN prekurzorů. Porovnáním vlastností vláken od různých výrobců jsme zjistili, že uváděné vlastnosti v jednotlivých kategoriích jsou srovnatelné a odpovídají standardům uváděným pro danou kategorii [2,3]. Z tohoto můžeme usuzovat, že při výběru firmy, jako dodavatele uhlíkových materiálů je dobré sledovat jednak cenu vláken a jednak průběžně ověřovat, jestli uvedené údaje pro daná vlákna odpovídají.

V experimentální části byly hodnoceny základní parametry vybraných uhlíkových vláken pro jejichž měření byly použity standardní metody používané v laboratořích Katedry textilních materiálů [20]. Pro měření byla vybrána vlákna největšího světového výrobce společnosti Toray industries, Inc. z Japonska a to vlákno T800H, které patří mezi komerčně nejúspěšnější středněmodulová vlákna, a vlákno M46J, které patří do skupiny vysokomodulových vláken na bázi PAN, jejichž pevnostní charakteristiky údajně předčí vlákna na bázi smol.

Po vyhodnocení naměřených dat můžeme konstatovat, že materiálové a pevnostní charakteristiky uváděné pro vlákno T800H jsou téměř totožné s údaji od výrobce. U vlákna M46J se shodovali materiálové parametry, ale u pevnostních charakteristik se rozcházeli hodnoty tažnosti (téměř dvojnásobná) což způsobilo výrazný pokles modulu. Je možné, že docházelo při experimentu k vyššímu prokluzu vláken v čelistech (hladší povrch než u T800H). Také můžeme usuzovat, že výrobce poslal jiný typ vlákna. Podíváme-li se do tabulky s přehledem všech vláken, která společnost Toray industries, Inc. z Japonska nabízí, nalezneme tam vlákna jiná, která více odpovídají naměřené hodnotě prodloužení. Nadruhou stranu se ale liší v dalších parametrech. Můžeme také předpokládat, že vlákna mohla být poškozená neprávnu manipulací a skladováním. Toto bychom doporučili k dalšímu zkoumání.

Výsledky předložené práce jsou podkladem pro hlubší analýzu struktury a vlastností komerčně dodávaných uhlíkových vláken, jejíž součástí bude experimentální měření parametrů vláken od různých výrobců, analýza dalších vlastností (elektrických, tepelných, termo-mechanických apod.) a návrh použití těchto materiálů v průmyslových aplikacích.

LITERATURA

- [1] Savage, G.: Carbon-Carbon Composites, London, 1993
- [2] Fitzer, E., Manocha, L.M.: Carbon reinforcement and Carbon-Carbon Composites, Springer Verlag, Berlin, 1998
- [3] Oberlin, A., Guigon, M.: The Structure of Carbon Fibres, in "Fiber Reinforcement for Composite Materials", ed. A.R. Bunsell, Elsevier, Amsterdam, 1988, str. 149-210
- [4] Wikipedia, The Free Encyclopedia. Dostupné na: <http://en.wikipedia.org/wiki/Carbon#Graphite>
- [5] Wikipedie, Otevřená encyklopedie. Dostupné na: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Uhlík>
- [6] Tomková, B.: Textilní kompozity, KTM TU v Liberci, 2008. Dostupné na: http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20081118/07_Prednaska.pdf
- [7] Wapedia, Mobilní encyklopedie. Dostupné na: http://wapedia.mobi/cs/Uhlíkové_vlákno
- [8] Kořínek, Z.: Vlákná pro kompozity. Dostupné na: <http://www.volny.cz/zkorinek/>
- [9] Grégr, J.; Slavík, M.; Šilcová, M.: Povrch uhlíkových vláken, KCHT TU v Liberci, 2007. Dostupné na: http://www.fp.tul.cz/kch/public/2slides_page/
- [10] Ružbarská, D.: Diplomová práce, TU v Liberci, 2004
- [11] Kořínek, Z.: Definice a historie kompozitů. Dostupné na: <http://www.volny.cz/zkorinek/>
- [12] Toray Industries, Inc. Dostupné na: <http://www.toraycfa.com/>
- [13] Toho Tenax Co., Ltd. Dostupné na: <http://www.tohotenax.com/tenax/en/index.php>
- [14] Mitsubishi Rayon Co., Ltd. Dostupné na: <http://www.mrc.co.jp/english/>
- [15] Grafil Inc. Dostupné na: <http://www.grafil.com/>
- [16] Mitsubishi Chemical Corporation. Dostupné na: http://www.m-kagaku.co.jp/index_en.htm
- [17] Výrobci uhlíkových vláken. Dostupné na: <http://www.cyttec.com/>, <http://www.hexcel.com/>, <http://www.sglgroup.com/>, <http://www.zoltek.com/>, <http://www31.ocn.ne.jp/~ngf/english/>
- [18] Kovačič, V.: Zkoušení textilií, KTM TU v Liberci, 2008. Dostupné na: http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20080401/ZKB_prednaska_5.pdf
- [19] Interní materiály, KTM TU v Liberci, 2009
- [20] ČSN EN ISO/IEC 17025:2001 Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří. ČSNI, 2001

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Postup výroby uhlíkového vlákna z PAN
- Obr. 2 Model uspořádání grafenových rovin ve struktuře uhlíkových vláken
1. sloupec vlákna z PAN, 2. a 3. sloupec vlákna z mezofázových smol
- Obr. 3 Graf podílu výrobců uhlíkových vláken z PAN
- Obr. 4 Lanametr
- Obr. 5 LabTest 2.010
- Obr. 6 VEGA fy TESCAN
- Obr. 7 Pracovní křivka vlákna T800H (vzorek č.3)
- Obr. 8 Pracovní křivka vlákna T800H (vzorek č.2)
- Obr. 9 Mikrofotografie vlákna T800H
- Obr. 10 Mikrofotografie vlákna M46J

SEZNAM TABULEK

- Tab. 1 Typické vlastnosti vybraných typů uhlíkových materiálů
- Tab. 2 Typické vlastnosti uhlíkových vláken z PAN
- Tab. 3 Typické vlastnosti uhlíkových vláken z mezofázových smol
- Tab. 4 Výrobci uhlíkových vláken.
- Tab. 5 Základní parametry uhlíkového vlákna T800H
- Tab. 6 Základní parametry uhlíkového vlákna M46J
- Tab. 7 Statistika naměřených průměrů vláken
- Tab. 8 Průměrné měrné hmotnosti vláken
- Tab. 9 Tabulka průměrných hodnot síly F [N] a prodloužení Δl [mm]
- Tab. 10 Počítané parametry vláken

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: Tabulka uhlíkových vláken Torayca od Toray Industries, Inc.

Příloha B: Tabulka uhlíkových vláken Tenax od Toho Tenax Co., Ltd.

Příloha C: Tabulky uhlíkových vláken Pyrofil a Grafil od Grafil Inc.

Příloha D: Tabulky uhlíkových vláken Dialed od Mitsubishi Chemical Corporation

Příloha E: Tabulky uhlíkových vláken Thornel od Cytac Engineered Materials

Příloha F: Tabulka uhlíkových vláken HexTow od Hexcel Corporation

Příloha G: Tabulka uhlíkových vláken Granoc od Nippon Graphite Fibers Co.

Příloha H: Příloha H: Statistická analýza: prodloužení vláken při přetrhu Δl [mm] a síla při přetrhu F [N]

PŘÍLOHA A

Tabulka uhlíkových vláken Torayca od Toray Industries, Inc. [12]

TORAYCA® QUALITY CARBON FIBER

The best from TORAY, leader in carbon fiber technology.

TORAYCA TYPICAL FIBER PROPERTIES										
FIBER TYPE	Number of Filaments	Sizing Type	Tensile Strength		Tensile Modulus		Elongation	Yield	Density	Standard Spool Size (kg)
			ksi	MPa	Msi	GPa	%	g/1000m	g/cm ³	
T300	1,000	4,5	512	3,530	33.4	230	1.5	66	1.76	1.0
	3,000 ¹⁾	4,5						198		2.0
	6,000 ¹⁾	4,5						396		2.0
	12,000 ¹⁾	4,5						800		4.0
T300J	3,000 ²⁾	4	611	4,210	33.4	230	1.8	198	1.78	2.0
	6,000 ²⁾	4						396		2.0
	12,000	5						800		4.0
T400H	3,000 6,000	4 4	640	4,410	36.3	250	1.8	198 396	1.80	2.0 2.0
T600S	24,000 ³⁾	5,6	600	4,140	33.4	230	1.8	1,700	1.79	6.0
T700S	12,000 ³⁾	5,6,F	711	4,900	33.4	230	2.1	800	1.80	6.0
	24,000 ³⁾	5,6,F						1,650		6.0
T700G	12,000 ³⁾	3	711	4,900	34.8	240	2.0	800	1.80	6.0
	24,000 ³⁾	3						1,650		6.0
T800H	6,000 12,000	4 4,5	796	5,490	42.7	294	1.9	223 445	1.81	2.0 4.0
T800S	24,000 ³⁾	1	853	5,880	42.7	294	2.0	1,030	1.80	4.0
T1000G	12,000	4	924	6,370	42.7	294	2.2	485	1.80	2.0
M35J	6,000 12,000	5 5	683	4,700	49.8	343	1.4	225 450	1.75	1.0 2.0
M40J	3,000	5	640	4,410	54.7	377	1.2	113	1.77	0.5
	6,000 ¹⁾	5						225		1.0
	12,000 ¹⁾	5						450		2.0
M46J	6,000 ¹⁾	5	611	4,210	63.3	436	1.0	223	1.84	1.0
	12,000 ¹⁾	5						445		2.0
M50J	3,000 6,000	5 5	597	4,120	69.0	475	0.8	109 218	1.88	0.5 1.0
M55J	6,000	5	583	4,020	78.2	540	0.8	218	1.91	0.5
M60J	3,000 6,000	5 5	569	3,920	85.3	588	0.7	103 206	1.93	0.2 0.4
M30S	18,000 ³⁾	5	796	5,490	42.7	294	1.9	760	1.73	4.0
M30G	18,000 ³⁾	1	739	5,100	42.7	294	1.7	760	1.73	4.0
M40	1,000	5	398	2,740	56.9	392	0.7	61	1.81	0.15
	3,000	4						182		1.0
	6,000 ¹⁾	5						364		1.5
	12,000 ¹⁾	5						728		4.0

* Measured using the impregnated strand method.
This information can be used for material selection purposes only.

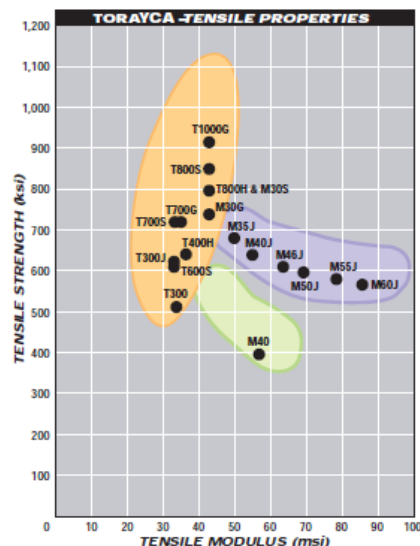
¹⁾ These equivalent fibers are also produced by SOFCAR in France.

²⁾ These fibers are produced by SOFCAR.

³⁾ These equivalent fibers are also produced by CFA in Alabama.

Torayca offers reliability based on

- the world's widest range of user qualifications, utilizing technology backed by Toray's research and development activities
- highly consistent product quality, a result of Toray's quality control system
- a yarn that ensures superior handling and processing
- the largest variety of carbon fiber product specifications, with numerous strength and modulus combinations available
- a comprehensive quality control system that has satisfied audits by various aircraft manufacturers



PŘÍLOHA B:

Tabulka uhlíkových vláken Tenax od Toho Tenax Co., Ltd. [13]



TEIJIN

Properties of Filament

Grade		Filament Count	Yield	Tensile strengtd		Tensile Modulus		Elongation	Filament Dia.	Density	Electrical Resistivity
				tex	kgf/mm ² MPa	tonf/mm ²	GPa				
HTA40	1K	1000	67	390	3800	24	238	1.6	7.0	1.78	1.6 x 10 ⁻³
HTS40	3K	3000	200	430	4200	24	240	1.8	7.0	1.76	1.6 x 10 ⁻³
	6K	6000	400	430	4200	24	240	1.8	7.0	1.76	1.6 x 10 ⁻³
	12K	12000	800	430	4200	24	240	1.8	7.0	1.76	1.6 x 10 ⁻³
STS40	24K	24000	1600	410	4000	24	240	1.7	7.0	1.75	1.7 x 10 ⁻³
UTS50	12K	12000	800	500	4900	24	240	2.0	6.9	1.80	1.6 x 10 ⁻³
	24K	24000	1600	510	5000	24	240	2.1	6.9	1.79	1.8 x 10 ⁻³
IMS40	6K	6000	340	480	4700	30	295	1.6	6.4	1.76	1.3 x 10 ⁻³
	12K	12000	670	480	4700	30	295	1.6	6.4	1.76	1.3 x 10 ⁻³
IMS60	6K	6000	205	590	5800	30	290	2.0	5.0	1.80	1.4 x 10 ⁻³
	12K	12000	410	590	5800	30	290	2.0	5.0	1.80	1.4 x 10 ⁻³
	24K	24000	830	590	5800	30	290	2.0	5.0	1.80	1.4 x 10 ⁻³
HMA35	12K	12000	770	330	3200	37(35)	360(345)	0.9	6.7	1.78	1.0 x 10 ⁻³
UMS40	12K	12000	400	470	4600	40(39)	395(380)	1.2	4.8	1.79	1.0 x 10 ⁻³
	24K	24000	800	470	4600	40(39)	395(380)	1.2	4.8	1.79	1.0 x 10 ⁻³
UMS45	12K	12000	385	470	4600	44(42)	430(415)	1.1	4.7	1.81	9.7 x 10 ⁻⁴
UMS55	12K	12000	360	420	4100	55	540	0.8	4.4	1.92	7.8 x 10 ⁻⁴

Note

*Measured by Toho standard test method, Figures are not warranty value, For fiber selection purposes only.

*Tensile Modulus is culculated by,.

No parenthetic data : The datas are culculated at 0.5% of elongation (without UMS55). UMS55 is culculated at 0.1-0.3% of elongation.

(Parenthetic data) : The datas are culculated at 0.2-0.4% of elongation.

*Carbon fiber and its related products are subject to control under export/import regulations of each country.

Numbers in this sheet should not be used for export/import licence application.

Please contact us for detail.

PŘÍLOHA C:

Tabulky uhlíkových vláken Pyrofil a Grafil od Grafil Inc. [15]

GRAFIL INC.

PYROFIL™ – Typical Properties of Carbon Fiber

Fiber Type	Number of Filaments	Strength* Ksi (MPa)	Modulus* Msi (GPa)	Density lb/in ³ (g/cm ³)	Yield yds/lb (mg/m)	Denier (Tex)	X-Sectional Area in ² (mm ²)	Elongation %	Filament Diameter μ m
TR30S	3,000	640 (4,410)	34 (235)	0.065 (1.79)	2,480 (200)	1,800 (200)	1.73x10 ⁻⁴ (0.112)	1.9	7
TR50S ^Δ	6,000	710 (4,900)	34 (235)	0.066 (1.82)	1,240 (400)	3,600 (400)	3.46x10 ⁻⁴ (0.223)	2.1	7
TR50S	12,000	710 (4,900)	35 (240)	0.066 (1.82)	620 (800)	7,200 (800)	6.83x10 ⁻⁴ (0.440)	2.0	7
TR50S	15,000	710 (4,900)	35 (240)	0.066 (1.82)	496 (1,000)	9,000 (1,000)	8.54x10 ⁻⁴ (0.550)	2.0	7
TRH50	12,000	710 (4,900)	37 (255)	0.065 (1.81)	620 (800)	7,200 (800)	6.85x10 ⁻⁴ (0.442)	1.9	7
TRH50 ^Δ	18,000	768 (5,300)	36 (250)	0.066 (1.82)	496 (1,000)	9,000 (1,000)	8.52x10 ⁻⁴ (0.549)	2.1	6
TR330 ^Δ	50,000	522 (3,600)	34 (235)	0.065 (1.80)	150 (3,300)	29,700 (3,300)	2.84x10 ⁻³ (1.833)	1.5	7
MR40	12,000	640 (4,410)	43 (295)	0.064 (1.76)	825 (600)	5,400 (600)	5.30x10 ⁻⁴ (0.340)	1.5	6
MR60H	24,000	825 (5,680)	42 (290)	0.065 (1.81)	517 (960)	8,640 (960)	7.20x10 ⁻⁴ (0.464)	2.0	5
MS40	12,000	640 (4,410)	50 (345)	0.064 (1.77)	825 (600)	5,400 (600)	5.30x10 ⁻⁴ (0.340)	1.3	6
HR40	12,000	640 (4,410)	57 (395)	0.066 (1.82)	825 (600)	5,400 (600)	5.10x10 ⁻⁴ (0.329)	1.2	6
HS40	12,000	670 (4,610)	66 (455)	0.067 (1.85)	1155 (430)	3,870 (430)	3.60x10 ⁻⁴ (0.232)	1.0	5

Tested to the requirements of JISR 7601 unless otherwise indicated

^Δ Tested to the requirements of ASTM D4018

* Measured on impregnated strand

GRAFIL INC.

GRAFIL – Typical Properties of Carbon Fiber

Fiber Type	Number of Filaments	Strength* Ksi (MPa)	Modulus* Msi (GPa)	Density lb/in ³ (g/cm ³)	Yield yds/lb (mg/m)	Denier (Tex)	X-Sectional Area in ² (mm ²)	Elongation %	Filament Diameter μ m
34-700	12,000	700 (4,830)	34 (234)	0.065 (1.80)	620 (800)	7,200 (800)	6.89x10 ⁻⁴ (0.444)	2.0	7
34-700	24,000	700 (4,830)	34 (234)	0.065 (1.80)	310 (1,600)	14,400 (1,600)	13.78x10 ⁻⁴ (0.888)	2.0	7
34-700WD	12,000	700 (4,830)	34 (234)	0.065 (1.80)	620 (800)	7,200 (800)	6.89x10 ⁻⁴ (0.444)	2.0	7
34-700WD	24,000	700 (4,830)	34 (234)	0.065 (1.80)	310 (1,600)	14,400 (1,600)	13.78x10 ⁻⁴ (0.888)	2.0	7
34-600	48,000	650 (4,500)	34 (234)	0.065 (1.80)	155 (3,200)	28,800 (3,200)	27.56x10 ⁻⁴ (1.776)	1.9	7
34-600WD	48,000	650 (4,500)	34 (234)	0.065 (1.80)	155 (3,200)	28,800 (3,200)	27.56x10 ⁻⁴ (1.776)	1.9	7
34-700 Unsized	12,000	700 (4,830)	34 (234)	0.065 (1.80)	626 (793)	7,137 (793)	6.89x10 ⁻⁴ (0.444)	2.0	7

* Impregnated Strand Test – SACMA Methodology

PŘÍLOHA D:
Tabulky uhlíkových vláken Dialed od Mitsubishi Chemical
Corporation [14]



Continuous fiber: 10,12K type

1.Fiber properties (Typical data)

GRADE	Tensile Strength		Tensile Modulus		Elongation	Density	Yield		Thermal Conductivity	Filament Diameter	Filament Count
	MPa	KSI	GPa	MSI	%	g/cm ³	g/1,000m	Yard/lb	W/m·K	μ	-
K13710	2600	380	640	92	0.4	2.12	1400	350	140	10	10000
K13A10	2600	380	790	114	0.3	2.15	1400	350	220	10	10000
K32112	1600	230	190	27	0.8	1.93	2100	240	20	10	12000
K63312	2600	380	440	64	0.6	2.09	2000	250	110	11	12000
K63712	2600	380	640	92	0.4	2.12	2000	250	140	11	12000
K63B12	2600	380	860	125	0.3	2.15	1900	260	400	11	12000

PŘÍLOHA E:

Tabulky uhlíkových vláken Thornel od Cytec Engineered Materials [17]

Typical Properties for Thornel carbon fibers - Standard Products

BP Amoco Chemicals

Fiber Grade	Long. Thermal Conductivity W/mK	Trans. Thermal Conductivity W/mK(EST)	Electrical Resistivity micro ohm-m	Cross Section in ² *10 ⁻⁴	Yield grams/m	Yield g/m Relative To T-3003k	Yield Tex g/km	Specific Heat (300K)	Resistance ohms/cm	Resistance ohms/ft	Fiber Diameter microns	Density g/cc
PAN Based Carbon Fibers												
T-350	Ablative Products											
/21X AB 3k			150	21.8	0.249	126%	249	0.17	10.65	324.6	7	1.768
/23X AB 3k			90	21.4	0.244	123%	244	0.17	6.52	198.8	7	1.768
/25X AB 3k			70	21.0	0.240	121%	240	0.17	5.16	157.4	7	1.77
T-300												
1k	8.5	5	18	5.8	0.066	33%	66	0.17	4.80	146.3	7	1.76
3k	8.5	5	18	17.5	0.198	100%	198	0.17	1.59	48.6	7	1.76
6k	8.5	5	18	35	0.395	199%	395	0.17	0.80	24.3	7	1.76
12k	8.5	5	18	70	0.794	401%	794	0.17	0.40	12.1	7	1.76
T-650/35												
3k	14	5	14.9	17.2	0.198	99%	198	0.17	1.34	40.9	6.8	1.77
6k	14	5	14.9	34.1	0.391	197%	391	0.17	0.68	20.6	6.8	1.77
12k	14	5	14.9	68.9	0.783	385%	783	0.17	0.35	10.5	6.8	1.77
T-650/42												
6k	15	5	14.2	19.5	0.224	113%	224	0.17	1.13	34.40	5.1	1.78
12k	15	5	14.2	38.2	0.44	222%	440		0.58	17.6	5.1	1.78
Pitch Based Carbon Fibers												
P-25												
2k	22	10	13.0	26	0.332	168%	332	0.17	0.78	23.6	11	1.90
4k	22	10	13.0	59	0.715	361%	715	0.17	0.34	10.4	11	1.90
P-30X												
2k	40	10	11.2	26	0.328	166%	328	0.17	0.67	20.4	11	1.99
2k (GPX-7)			11.6	12.2	0.155	78%	155	0.17	1.47	44.9	7	1.99
2k (GPX-8)			11.6	15.6	0.198	100%	198	0.17	1.15	35.1	7	1.99
P-55S												
2k	120	5	8.5	25	0.320	162%	320	0.17	0.53	16.1	10	2.00
4k	120	5	8.5	56	0.714	361%	714	0.17	0.24	7.2	10	2.00
P-75S 2k	185	2.4	7.0	25	0.320	162%	320	0.17	0.43	13.2	10	2.05
P-100S 2k	520	2.4	2.5	23	0.317	160%	317	0.17	0.17	5.1	10	2.15
P-120S 2k	640	2.4	2.2	23	0.325	164%	325	0.17	0.15	4.5	10	2.18
K-1100 2k	1000	2.4	1.3	23	0.325	164%	325	0.17	0.09	2.7	10	2.20
The information contained in this publication is not comprehensive. Despite our efforts, it may not be accurate, up to date or applicable to the circumstances of any particular case. We cannot accept any liability for any inaccuracies or omissions in this publication and any decisions you make based on information contained in this publication are your sole responsibility. We are of course happy to discuss with you the implications of any issue raised if you contact us. No information contained in this publication constitutes an invitation by or on behalf of BP Amoco p.l.c. or any of its												

The information contained in this publication is not comprehensive. Despite our efforts, it may not be accurate, up to date or applicable to the circumstances of any particular case. We cannot accept any liability for any inaccuracies or omissions in this publication and any decisions you make based on information contained in this publication are your sole responsibility. We are of course happy to discuss with you the implications of any issue raised if you contact us. No information contained in this publication constitutes an invitation by or on behalf of BP Amoco p.l.c. or any of its subsidiaries to enter into a contract with you.

Typical Properties for Thornel carbon fibers - Standard Products

BP Amoco Chemicals

Fiber Grade	Long. Modulus 10 ⁶ psi	Long. Modulus GPA	Transv. Modulus 10 ⁶ psi	Long. Shear Mod. 10 ⁶ psi	Transv. Shear Mod. 10 ⁶ psi	Long. Poisson's axial	Transverse Poisson's	Long. CTE ppm/C	Transv. CTE ppm/ C	Long. Strength 10 ³ psi	Long. Strength GPA	Long. Compr. Str. 10 ³ psi	Shear Strength 10 ³ psi
PAN Based Carbon Fibers													
T-350													
/21X AB 3k	21									350	2.41		
/23X AB 3k	23.9									353	2.43		
/25X AB 3k	24.7									363	2.50		
T-300													
1k	33.5	231	2.1	3.3	0.7	0.27		-0.6	9	530	3.66	420	17
3k	33.5	231	2.1	3.3	0.7	0.27		-0.6	9	530	3.66	420	17
6k	33.5	231	2.1	3.3	0.7	0.27		-0.6	9	530	3.66	420	17
12k	33.5	231	2.1	3.3	0.7	0.27		-0.6	9	530	3.66	420	17
T-650/35													
3k	35	241	2.1	3.3	0.7	0.27		-0.6	9	620	4.28	420	17
6k	35	241	2.1	3.3	0.7	0.27		-0.6	9	620	4.28	420	17
12k	35	241	2.1	3.3	0.7	0.27		-0.6	9	620	4.28	420	17
T-650/42													
6k	42	290	2.0	3.3	0.7	0.29		-0.75	8	670	4.62	420	17
12k	42	290	2.0	3.3	0.7	0.29		-0.75	8	670	4.62	420	17
Pitch Based Carbon Fibers													
P-25													
2k	23	159	1.3	-	-	0.23	0.74	-	-	200	1.38	150	5
4k	23	159	1.3	-	-	0.23	0.74	-	-	200	1.38	150	5
P-30X													
2k	29.1	201	1.3	-	-	0.23	0.74	-	-	400	2.76	150	5
2k (GPX-7)	29.1	201	1.3	-	-	0.23	0.74	-	-	400	2.76	150	5
2k (GPX-8)	29.1	201	1.3	-	-	0.23	0.74	-	-	400	2.76	150	5
P-55S													
2k	55	379	1.3	-	-	0.23	0.74	-1.30	-	275	1.90	120	7 to 12
4k	60	414	1.3	-	-	0.23	0.74	-1.30	-	275	1.90	120	7 to 12
P-75S 2k													
	75	517	1.3	1.90	-	0.23	0.74	-1.46	12.5	300	2.07	100	7 to 12
P-100S 2k													
	110	759	1.0	3.00	-	0.26	0.74	-1.48	12.0	350	2.41	75	4 to 6
P-120S 2k													
	120	828	1.0	3.00	-	0.3	0.85	-1.50	12.0	350	2.41	60	2 to 5
K-1100 2k													
	135	931	1.0	-	-	0.3	0.85	-1.50	12.0	450	3.10	50	2 to 5

PŘÍLOHA F:

Tabulka uhlíkových vláken HexTow od Hexcel Corporation [17]

HexTow™ Carbon Fiber Products from Hexcel

TYPICAL PRODUCT DATA

Fiber Type	Number of Filaments	Tensile Strength		Tensile Modulus *		Strain **	Weight/Length	Density
		ksi	MPa	Msi	GPa	%	(g/m)	(g/cm³)
AS2C	3,000	648	4,470	32.0	221	1.9	0.200	1.80
AS4	3,000	650	4,480	33.5	231	1.8	0.210	1.79
	6,000	638	4,400	33.5	231	1.8	0.427	1.79
	12,000	638	4,400	33.5	231	1.8	0.858	1.79
AS4C	3,000	674	4,650	33.5	231	1.8	0.200	1.78
	6,000	641	4,420	33.5	231	1.8	0.400	1.78
	12,000	640	4,410	33.5	231	1.8	0.800	1.78
AS4D	12,000	696	4,800	35.5	245	1.8	0.765	1.79
AS7	12,000	700	4,830	35.0	241	1.8	0.800	1.79
IM6	12,000	827	5,700	40.5	279	1.9	0.446	1.76
IM7	6,000	795	5,480	40.0	276	1.8	0.223	1.78
	12,000	808	5,570	40.0	276	1.9	0.446	1.78
IM9	12,000	890	6,140	44.0	304	1.9	0.335	1.80
PV42/850	12,000	843	5,810	42.0	292	1.9	0.446	1.79

* Tensile Modulus Calculated at Secant 6000 - 1000

** Strain at Failure

PŘÍLOHA G:

Tabulka uhlíkových vláken Granoc od Nippon Graphite Fibers Co.

[18]



NIPPON GRAPHITE FIBER CORPORATION

[Top page](#)

[About Us](#)

[Application](#)

[Contact Us](#)

GRANOC Yarn

YSH-A series

/ High modulus and high compressive strength fibers/ 7 micron diameter

Grade	Tensile Modulus		Tensile Strength		Elongation	Density	Tow count	Yield
	GPa	MSI	MPa	KSI	%	g/cm ³	K	g/1000m
YSH-70A	720	105	3630	530	0.5	2.14	1/3/6	75/250/520
YSH-60A	630	92	3900	570	0.6	2.12	1/3/6	75/250/520
YSH-50A	520	76	3900	570	0.7	2.10	1/3/6	75/250/520

[Data Sheet](#)

YS-A series

/ Ultra high modulus and high thermal conductive fibers/ 7 micron diameter

Grade	Tensile Modulus		Tensile Strength		Elongation	Density	Tow count	Yield
	GPa	MSI	MPa	KSI	%	g/cm ³	K	g/1000m
YS-95A	900	131	3530	510	0.3	2.19	1.5/3/6	125/250/520
YS-90A	880	128	3530	510	0.3	2.18	3/6	250/520
YS-80A	785	114	3630	530	0.5	2.17	3/6	250/520

[Data Sheet](#)

CN series

/ High modulus fibers / 10 micron diameter

Grade	Tensile Modulus		Tensile Strength		Elongation	Density	Tow count	Yield
	GPa	MSI	MPa	KSI	%	g/cm ³	K	g/1000m
CN-90	860	125	3430	500	0.4	2.19	6	880
CN-80	780	114	3430	500	0.5	2.17	3/6/12	445/890/1780
CN-60	620	90	3430	500	0.6	2.12	3/6	445/890
CNG-90	880	128	3100	450	0.3	2.21	6	880

[Data Sheet](#)

XN series

/ Low modulus and high elongation fibers / 10 micron diameter

Grade	Tensile Modulus		Tensile Strength		Elongation	Density	Tow count	Yield
	GPa	MSI	MPa	KSI	%	g/cm ³	K	g/1000m
XN-15	155	22	2400	350	1.5	1.85	3	410
XN-10	110	16	1700	250	1.6	1.70	3	470
XN-05	54	8	1100	160	2.0	1.65	3	470

[Data Sheet](#)

Small tow series

Grade	Tensile Modulus		Tensile Strength		Elongation	Density	Tow count	Yield
	GPa	MSI	MPa	KSI	%	g/cm ³	K	g/1000m
YSH-50A-04S	520	76	3900	570	0.7	2.10	0.4	30
YSH-70A-04S	720	105	3630	530	0.5	2.14	0.4	30
YT-50A-04H	400	58	3830	560	0.8	2.08	1	60
YT-40A-04H	500	72	3830	560	0.7	2.10	1	60

PŘÍLOHA H:

Příloha H: Statistická analýza: prodloužení vláken při přetrhu Δl [mm] a síla při přetrhu F [N]

Prodloužení vláken při přetrhu Δl [mm]

vlákna	T800H	M46J
prodloužení Δl [mm]	0,2562	0,1781
rozptyl s^2	0,0029	0,0022
směrodatná odchylka s	0,0536	0,0472
variační koeficient v [%]	20,9275	26,5282
IS	<0,2470;0,2655>	<0,1696;0,1865>

Síla při přetrhu F [N]

vlákna	T800H	M46J
síla F [N]	0,1169	0,0932
rozptyl s^2	0,0019	0,0010
směrodatná odchylka s	0,0438	0,0320
variační koeficient v [%]	37,4674	34,3525
IS	<0,1093;0,1245>	<0,0875;0,0989>